Management Control, Auditing and Finance Review - MCAFR

Management Control, Auditing and Finance Review (MCAFR)
- Volume No 3 Issue No. 1 - 2026 - ISSN: 3009-5492

Intelligence artificielle et gouvernance hydrique résiliente : analyse comparative des modèles data-driven au Maroc, en Israël et à Singapour

Artificial Intelligence and Resilient Water Governance: A Comparative Analysis of Data-Driven Models in Morocco, Israel, and Singapore

Karim EL BETIOUI
Enseignant chercheur
Laboratoire d'Études et de Recherche en Management Intégré et Intelligence de la Performance (MI2P).
Faculté Pluridisciplinaire de Nador (FPN)
Université Mohammed Premier Oujda, MAROC
karim.elbetioui@ump.ac.ma
https://orcid.org/0009-0008-1971-9564

Abdelmalek BEKKAOUI
Enseignant chercheur
Laboratoire Universitaire de Recherche en Instrumentation et Gestion des Organisations (LURIGOR)
Faculté des Sciences Juridiques, Économiques et Sociales, Oujda
Université Mohamed Premier, Maroc
a.malekbekkaoui@gmail.com

Abdelilah SABOURI
Doctorant en droit publique et sciences politique
Laboratoire des droits et des sciences politiques (LDSP)
Faculté des Sciences Juridiques et Politiques, Settat
Université Hassan 1 Settat - Maroc
Ali.sab65@gmail.com

RÉSUMÉ

La gestion durable des ressources en eau constitue un enjeu stratégique majeur pour les pays confrontés à un stress hydrique structurel, dans un contexte où le changement climatique accentue la variabilité des précipitations et fragilise des systèmes déjà sous tension. Cet article analyse la transition d'une gouvernance hydrique traditionnelle vers des modèles intégrés fondés sur la donnée et l'intelligence artificielle (IA), à travers une comparaison de trois trajectoires nationales : le Maroc, Israël et Singapour.

S'appuyant sur une revue systématique de la littérature et une méthodologie qualitative comparative multi-cas, l'étude met en évidence les cadres institutionnels, les architectures technologiques et les mécanismes de pilotage propres à chaque contexte. Les résultats montrent que la performance des systèmes hydriques dépend fortement du niveau de maturité digitale, du degré de coordination décisionnelle et de la capacité d'intégration et de valorisation des données.

L'analyse révèle également des écarts notables en matière d'interopérabilité, de gouvernance des données et d'appropriation des technologies. À partir de ces constats, l'article propose un modèle conceptuel de gouvernance hydrique résiliente fondé sur la donnée, adapté au contexte marocain, articulé autour de trois dimensions complémentaires : institutionnelle, technologique et organisationnelle.

Mots-clés : gouvernance hydrique ; intelligence artificielle ; data-driven ; résilience ; stress hydrique ; analyse comparative

ABSTRACT

Sustainable water resource management has become a major strategic challenge for countries facing structural water stress, particularly in a context where climate change intensifies precipitation variability and further weakens already strained systems. This article analyzes the transition from traditional water governance toward integrated models based on data and artificial intelligence (AI), through a comparative examination of three national trajectories: Morocco, Israel, and Singapore.

Drawing on a systematic literature review and a qualitative comparative multi-case methodology, the study highlights the institutional frameworks, technological architectures, and governance mechanisms specific to each context. The findings show that the performance of water systems largely depends on the level of digital maturity, the degree of decision-making coordination, and the capacity to integrate and leverage data effectively.

The analysis also reveals significant gaps in terms of interoperability, data governance, and the adoption of emerging technologies. Based on these insights, the article proposes a conceptual model of data-driven resilient water governance tailored to the Moroccan context, structured around three complementary dimensions: institutional, technological, and organizational.

Key-words: water governance; artificial intelligence; data-driven; resilience; water stress; comparative analysis

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte de la recherche

La question de l'eau s'impose aujourd'hui comme un enjeu stratégique majeur à l'échelle mondiale. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2024), la disponibilité en eau renouvelable par habitant a diminué d'environ 7 % au cours de la dernière décennie, tandis que les prélèvements continuent de croître sous l'effet conjugué de la dynamique démographique, de l'urbanisation et de l'intensification agricole. Dans les régions semi-arides et arides, cette tendance atteint désormais des niveaux critiques, mettant sous tension la sécurité alimentaire, les équilibres économiques et, plus largement, la cohésion sociale (Ritchie & Roser, 2018). Le rapport mondial sur l'eau publié par l'UNESCO (2024) souligne, à cet égard, que plus de deux milliards de personnes vivent déjà dans des zones exposées à un stress hydrique élevé, avec des perspectives d'aggravation à l'horizon 2030 si les trajectoires actuelles se maintiennent.

Le cas du Maroc illustre de manière particulièrement significative cette vulnérabilité structurelle. La disponibilité en eau par habitant y est passée d'environ 2 500 m³/an dans les années 1960 à moins de 600 m³ en 2023, soit un niveau largement inférieur au seuil de pénurie hydrique tel que défini par l'indicateur de Falkenmark (Ouhbi & Boudhar, 2025). La succession de six années de sécheresse entre 2019 et 2024 constitue, par ailleurs, la période déficitaire la plus longue observée dans l'histoire hydrologique récente du pays (Direction Générale de la Météorologie, 2024). Les répercussions économiques sont immédiates : la production céréalière a enregistré une baisse supérieure à 40 % en 2024, entraînant une augmentation significative des importations (FAO, 2024). Dans le même sens, le Fonds Monétaire International souligne que les chocs pluviométriques expliquent près de 37 % de la variance de la production marocaine à moyen terme, révélant ainsi la forte dépendance de l'économie nationale aux conditions climatiques (FMI, 2022).

Face à cette situation, le Maroc a engagé une réponse ambitieuse à travers le Plan National de l'Eau (PNE 2020–2050), appuyé par un programme prioritaire de 143 milliards de dirhams, combinant la construction de nouveaux barrages, le développement du dessalement et l'interconnexion des bassins hydrauliques (Ministère de l'Équipement et de l'Eau, 2022). Néanmoins, une approche centrée exclusivement sur l'offre infrastructurelle montre aujourd'hui ses limites, notamment face à la complexité croissante des dynamiques hydriques et à l'accélération des perturbations climatiques. Dans ce contexte, la littérature récente met en évidence l'émergence progressive d'un nouveau paradigme de gouvernance fondé sur les données (data-driven governance). Celui-ci repose sur l'intégration de technologies telles que l'intelligence artificielle (IA), les capteurs connectés (IoT) et les jumeaux numériques, qui permettent d'améliorer les capacités de prévision, d'optimisation et de pilotage en temps réel des systèmes hydriques (Pahl-Wostl, 2020 ; Sit et al., 2020 ; Fuller et al., 2020).

Dans cette perspective, certains pays apparaissent comme des références en matière d'intégration de ces technologies dans la gouvernance de l'eau. Israël, confronté à une disponibilité en eau extrêmement limitée (environ 91 m³ par habitant), a développé un écosystème technologique avancé lui permettant notamment de recycler près de 90 % de ses eaux usées et de réduire les pertes en réseau à des niveaux très faibles. Singapour, cité-État de 733 km² disposant de ressources naturelles particulièrement restreintes (environ 105 m³ par habitant), a quant à lui engagé une digitalisation quasi complète de son système hydrique, avec un déploiement massif de capteurs IoT et une gestion intégrée des données à l'échelle nationale (UN-Water, 2023).

Ces deux trajectoires, construites dans des contextes de rareté comparables, voire plus contraints que celui du Maroc, offrent ainsi un cadre d'analyse particulièrement pertinent pour interroger les conditions de transition vers une gouvernance hydrique plus résiliente et davantage orientée par les données.

1.2. Problématique et question de recherche

Si les apports de l'intelligence artificielle dans la gestion technique de l'eau sont désormais bien documentés, notamment en matière de détection des fuites, de prévision de la demande ou encore d'optimisation énergétique des infrastructures hydrauliques, leur intégration dans les mécanismes de gouvernance publique demeure, en revanche, encore limitée et insuffisamment explorée, en particulier dans les pays du Sud. La littérature existante met en évidence une concentration des travaux sur les dimensions opérationnelles et techniques, au détriment des enjeux liés à la décision publique, à la coordination institutionnelle et à la structuration des systèmes de gouvernance (Sit et al., 2020 ; Pahl-Wostl, 2020).

Ce déséquilibre révèle une lacune importante. La transition vers des systèmes hydriques intelligents ne se réduit pas à l'adoption de technologies avancées, mais suppose également une transformation des cadres institutionnels et des modes de pilotage. Autrement dit, l'efficacité technique des outils d'intelligence artificielle ne garantit pas, à elle seule, l'émergence d'une gouvernance hydrique capable d'anticiper les risques, d'arbitrer entre usages concurrents et de s'adapter aux incertitudes climatiques. Dans cette perspective, la question centrale ne porte plus uniquement sur les potentialités techniques de l'IA, mais sur les conditions concrètes de son intégration dans des architectures de gouvernance complexes.

À partir de ce constat, la présente recherche s'organise autour d'une question centrale : ***dans quelle mesure l'intelligence artificielle et la valorisation des données peuvent-elles contribuer à l'émergence d'une gouvernance hydrique résiliente dans le contexte marocain ?***

Cette interrogation principale se décline en trois sous-questions complémentaires. La première consiste à *analyser les mécanismes par lesquels les technologies data-driven participent à l'amélioration des capacités de prévision, de pilotage et d'anticipation des systèmes hydriques*. La deuxième vise à *identifier les facteurs institutionnels, technologiques et organisationnels qui distinguent les modèles les plus performants des configurations encore émergentes*. La troisième, enfin, cherche à *évaluer dans quelle mesure les expériences internationales, notamment celles d'Israël et de Singapour, peuvent être adaptées au contexte marocain, en tenant compte de ses spécificités structurelles et de ses contraintes propres*.

L'intérêt scientifique de cette recherche est triple. Elle contribue, en premier lieu, à un champ encore peu structuré, celui des études comparatives de gouvernance de l'eau intégrant pleinement la dimension digitale (Özerol et al., 2018). Elle propose, en deuxième lieu, un cadre d'analyse articulant de manière cohérente les dimensions institutionnelle, technologique, organisationnelle et de résilience, souvent abordées de manière dissociée dans la littérature. Elle aboutit, enfin, à la formulation d'un modèle conceptuel opérationnel, conçu non seulement comme un outil d'analyse, mais également comme un instrument d'aide à la décision susceptible d'éclairer les politiques publiques hydriques au Maroc..

1.3. Structure de l'article

Afin de répondre à la problématique formulée, l'article est structuré en quatre parties principales, organisées de manière progressive. La première partie, correspondant aux sections 2 et 3, pose les fondements théoriques de la recherche. Elle mobilise les principaux cadres conceptuels relatifs à la gouvernance hydrique, à

l'approche fondée sur les données et à la résilience, avant de proposer un cadre d'analyse intégré adapté à l'objet de l'étude.

La deuxième partie, développée dans la section 4, présente le dispositif méthodologique retenu. Elle précise le positionnement épistémologique de la recherche, justifie le choix d'une approche qualitative comparative et détaille les modalités de collecte et d'analyse des données.

La troisième partie, couvrant les sections 5 et 6, est consacrée à l'analyse empirique. Elle s'appuie sur l'étude de trois cas nationaux, à savoir le Maroc, Israël et Singapour, puis propose une analyse comparative permettant de mettre en évidence les convergences et les divergences entre ces modèles.

Enfin, la quatrième partie, regroupant les sections 7, 8 et 9, discute les principaux résultats, propose un modèle conceptuel de gouvernance hydrique fondée sur les données et ouvre sur des perspectives de recherche, en soulignant notamment les enjeux de mise en œuvre dans le contexte marocain.

2. FONDEMENTS THÉORIQUES

2.1. Cadre conceptuel : gouvernance hydrique et résilience

La notion de gouvernance de l'eau a connu, au cours des deux dernières décennies, une évolution notable. Initialement centrée sur la gestion technique des infrastructures hydrauliques, telles que les barrages, les canaux ou les stations de traitement, elle s'est progressivement élargie pour intégrer une approche plus globale, prenant en compte les acteurs, les institutions, les règles formelles et informelles ainsi que les processus décisionnels (Pahl-Wostl, 2020). Cette évolution traduit un déplacement du regard, de la seule maîtrise technique des ressources vers une compréhension plus systémique des dynamiques de gestion de l'eau.

Dans cette perspective, l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques définit la gouvernance de l'eau comme l'ensemble des systèmes politiques, institutionnels et administratifs qui structurent les décisions relatives à la gestion et au développement des ressources hydriques (OCDE, 2015). Cette définition met en évidence trois dimensions essentielles, à savoir l'efficacité, entendue comme la capacité à atteindre les objectifs fixés, l'efficience, qui renvoie à l'optimisation des ressources mobilisées, et enfin la confiance ainsi que l'engagement des parties prenantes, qui conditionnent la légitimité des politiques publiques.

Les douze principes de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau constituent aujourd'hui une référence structurante dans ce domaine. Ils insistent notamment sur la nécessité de disposer de données fiables et transparentes, d'assurer une articulation cohérente entre les différents niveaux de gouvernance et de promouvoir l'innovation dans les modes de gestion. Le cadre d'indicateurs associé permet d'apprécier la performance des systèmes nationaux à l'aune de ces exigences (OCDE, 2018). Toutefois, comme le soulignent Jiménez et al. (2020), ces principes, bien qu'utiles pour structurer l'analyse, restent relativement généraux et offrent des orientations parfois insuffisamment opérationnelles pour guider l'action concrète. Cette limite invite à développer des cadres d'analyse plus contextualisés, capables de rendre compte des spécificités institutionnelles et territoriales.

Dans ce prolongement, plusieurs travaux récents mettent en évidence une évolution vers des approches plus adaptatives et différenciées, tenant compte de la diversité des contextes socio-écologiques. Cette dynamique s'inscrit dans une reconnaissance croissante de la complexité des systèmes hydriques, en particulier dans les pays du Sud, où les contraintes environnementales se combinent souvent à des fragilités institutionnelles.

L'émergence de formes de gouvernance polycentrique et de coordination multi-niveaux illustre cette transformation, en soulignant la nécessité d'articuler les échelles locale, régionale et nationale dans les processus de décision (Pahl-Wostl & Knieper, 2023 ; Özerol et al., 2018).

Parallèlement, la notion de résilience hydrique s'est imposée comme un cadre analytique central. Elle renvoie à la capacité d'un système à absorber les perturbations, à maintenir ses fonctions essentielles et, le cas échéant, à se transformer pour faire face à de nouvelles contraintes (Butler et al., 2017). Issue des sciences écologiques, cette notion a été progressivement adaptée aux systèmes sociotechniques, notamment dans le domaine de l'approvisionnement en eau. Elle permet de dépasser une logique strictement réactive pour intégrer des dimensions d'adaptation et d'anticipation. Dans cette optique, Grey et Sadoff (2007) introduisent la notion de sécurité hydrique, définie comme la capacité à garantir une disponibilité suffisante et de qualité de la ressource, tout en maîtrisant les risques associés.

L'articulation entre gouvernance et résilience met ainsi en évidence un enjeu central. Il ne s'agit plus uniquement de gérer la ressource dans une logique de réponse aux crises, mais de concevoir des systèmes capables d'anticiper les perturbations et d'ajuster leurs modes de fonctionnement en conséquence. Cette transition suppose à la fois des arrangements institutionnels adaptés et des outils décisionnels performants. C'est précisément dans cet espace que s'inscrit l'approche fondée sur les données, qui constitue le point d'entrée de la section suivante.

2.2. Ancrage théorique : l'approche data-driven dans la gestion des ressources naturelles

L'approche dite data-driven, ou gouvernance fondée sur les données, s'inscrit dans le prolongement des travaux relatifs à l'administration numérique et aux politiques publiques fondées sur les preuves. Elle traduit une évolution des modes de pilotage, où la décision ne repose plus uniquement sur des règles préétablies ou sur l'expérience accumulée, mais s'appuie de manière croissante sur l'exploitation de données massives et dynamiques. Dans le domaine de l'eau, cette approche repose sur la collecte continue d'informations à partir de capteurs connectés, leur transmission sécurisée, leur traitement à l'aide d'outils analytiques avancés, puis leur traduction en indicateurs et en recommandations directement mobilisables par les décideurs publics (Asian Development Bank, 2021 ; Sit et al., 2020).

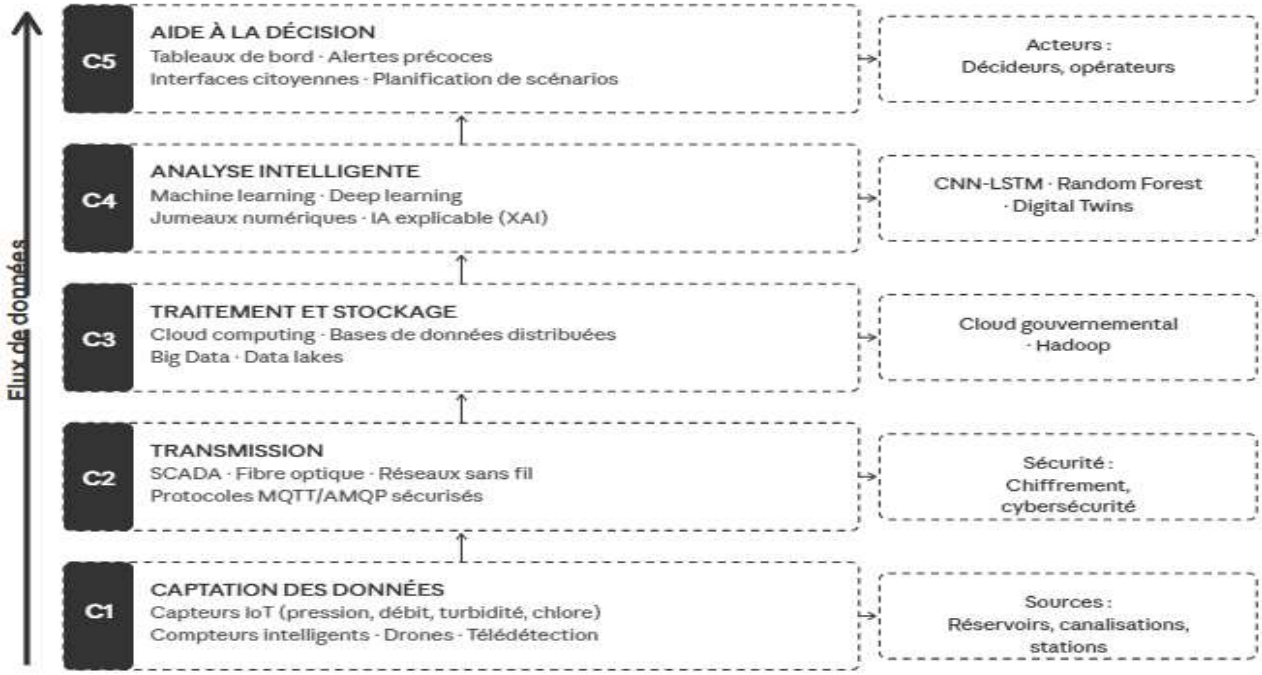
Dans cette perspective, l'intégration de l'intelligence artificielle dans les systèmes hydriques ne se limite pas à une amélioration des performances techniques. Elle introduit une transformation plus profonde des logiques de gouvernance, en favorisant le passage d'un pilotage fondé sur des schémas statiques à une prise de décision informée par des modèles prédictifs évolutifs. Les travaux récents montrent ainsi que l'exploitation des données en temps réel permet d'anticiper les variations de la demande, de détecter les anomalies ou encore d'optimiser l'allocation des ressources, contribuant à une gestion plus proactive et adaptative des systèmes hydriques (Dai et al., 2025).

Sur le plan opérationnel, cette transformation s'appuie sur une architecture technologique structurée, généralement désignée sous le terme de Smart Water Management. Celle-ci s'organise autour de plusieurs couches fonctionnelles complémentaires. La première correspond à la captation des données, assurée par des capteurs IoT, des compteurs intelligents et des dispositifs de télédétection. La deuxième concerne la transmission de l'information, mobilisant des systèmes de supervision tels que les réseaux SCADA, ainsi que des infrastructures de communication sécurisées. La troisième couche est dédiée au traitement et au stockage des données, souvent fondés sur des solutions de cloud computing et des bases de données distribuées permettant de gérer des volumes importants d'informations.

La quatrième couche, au cœur du dispositif, repose sur l'analyse intelligente des données. Elle intègre des techniques de machine learning et de deep learning, ainsi que des outils de modélisation avancée, tels que les jumeaux numériques, qui permettent de simuler le comportement des systèmes hydriques en temps réel. Enfin, la cinquième couche concerne l'aide à la décision. Elle se matérialise par des tableaux de bord, des systèmes d'alerte précoce et des interfaces facilitant l'interaction entre les différents acteurs, contribuant ainsi à une gouvernance plus réactive et, dans certains cas, plus participative.

Au-delà de sa dimension technologique, l'approche data-driven soulève des enjeux organisationnels et institutionnels importants. Son efficacité dépend en effet de la capacité des systèmes de gouvernance à intégrer ces flux d'information, à assurer leur qualité et à les traduire en décisions pertinentes. Elle implique également une évolution des compétences, des pratiques professionnelles et des modes de coordination entre acteurs. Ainsi, la question n'est pas uniquement celle de la disponibilité des technologies, mais bien celle de leur inscription dans des cadres de gouvernance capables d'en exploiter pleinement le potentiel.

Figure 1. Architecture à cinq couches d'un système de Smart Water Management (SWM)



Source : Adapté de Dai et al. (2025) — Water, 17(13), 1932 ; et Iancu et al. (2024)

Sur le plan théorique, l'intégration de l'intelligence artificielle dans la gouvernance hydrique peut être analysée à travers le cadre STEER proposé par Pahl-Wostl (2020). Ce cadre, de nature transdisciplinaire, articule plusieurs dimensions complémentaires, à savoir le contexte environnemental et sociétal, les structures de gouvernance, les processus de gestion et les capacités d'adaptation des systèmes. Il offre ainsi une grille de lecture particulièrement utile pour comprendre comment les technologies numériques influencent les dynamiques décisionnelles, les mécanismes de coordination et, plus largement, les relations entre acteurs au sein des systèmes de gestion de l'eau.

L'intérêt du cadre STEER réside notamment dans sa capacité à structurer des analyses comparatives, en mobilisant un ensemble cohérent de variables permettant d'appréhender les interactions entre les différentes composantes de la gouvernance. Il ne se limite pas à une approche descriptive, mais permet d'identifier les

conditions dans lesquelles les innovations technologiques, telles que l'intelligence artificielle, peuvent effectivement contribuer à renforcer les capacités adaptatives des systèmes hydriques.

Dans une perspective complémentaire, la Banque asiatique de développement souligne que la transformation digitale du secteur de l'eau ne peut être réduite à un simple enjeu technologique (Asian Development Bank, 2021). Elle suppose une évolution plus large des structures organisationnelles, des procédures opérationnelles et des cadres réglementaires, ainsi qu'une appropriation effective des outils numériques par les acteurs concernés, qu'il s'agisse des professionnels du secteur ou des usagers.

Selon cette institution, l'intégration des technologies d'intelligence artificielle et de traitement des données peut générer des gains significatifs en termes d'efficience. Les estimations avancées indiquent une réduction potentielle des dépenses annuelles d'une utility typique de l'ordre de 7,4 %, principalement liée à une meilleure allocation des investissements en capital et à une diminution des volumes d'eau non facturée. Ces résultats suggèrent que les technologies data-driven ne constituent pas seulement un levier d'innovation technique, mais également un instrument de rationalisation économique, à condition qu'elles soient intégrées dans des dispositifs de gouvernance cohérents et adaptés.

2.3. Revue de littérature empirique : IA et gestion de l'eau

La littérature récente sur l'application de l'intelligence artificielle à la gestion de l'eau connaît une expansion rapide, portée par l'intensification des contraintes hydriques et la diffusion des technologies numériques dans l'action publique. Elle s'organise principalement autour d'applications techniques visant l'amélioration des performances des systèmes hydriques. Les travaux existants montrent que les approches dominantes reposent sur des méthodes de machine learning et de deep learning, mobilisées pour optimiser les infrastructures, améliorer la qualité de l'eau et renforcer les capacités de prévision (Sit et al., 2020).

Cependant, un déséquilibre persiste entre avancées technologiques et intégration dans les dispositifs de gouvernance. Les usages orientés vers l'aide à la décision stratégique, l'évaluation des politiques publiques ou la coordination institutionnelle restent limités. Cette situation reflète une tension entre le développement rapide des outils analytiques et la capacité des institutions à les intégrer dans des cadres décisionnels stabilisés.

Trois axes structurants émergent de la littérature. Le premier concerne la prévision de la demande, l'optimisation des usages et la détection des anomalies, domaines dans lesquels les modèles de deep learning se révèlent particulièrement efficaces, notamment dans des contextes de forte variabilité hydrologique. Le deuxième axe porte sur les jumeaux numériques, qui permettent de simuler en temps réel le comportement des systèmes hydriques et de tester différents scénarios sans risque pour les infrastructures, contribuant ainsi à une gestion plus anticipative (Fuller et al., 2020). Le troisième axe, plus récent, concerne l'acceptabilité des technologies d'IA, où la transparence des modèles et leur compréhension apparaissent comme des conditions essentielles à leur appropriation par les décideurs publics.

Malgré ces avancées, les études comparatives restent limitées. Comme le soulignent Özerol et al. (2018), la majorité des travaux repose sur des études de cas isolées, ce qui limite l'identification de facteurs explicatifs robustes et la production d'enseignements transférables.

Dans ce contexte, cet article vise à contribuer à la structuration du champ en proposant une analyse comparative de trois modèles nationaux, articulant dimensions technologique, institutionnelle et organisationnelle, afin d'identifier les conditions d'émergence de systèmes hydriques plus résilients.

3. CADRE CONCEPTUEL PROPOSÉ

Le cadre conceptuel mobilisé dans cette recherche s'articule autour de quatre dimensions centrales : gouvernance hydrique, valorisation des données, intelligence artificielle et résilience. Il vise à proposer une grille d'analyse permettant de comparer de manière structurée les modèles nationaux, en tenant compte de leurs spécificités institutionnelles, de leurs contraintes structurelles et de leurs trajectoires technologiques. L'objectif est d'identifier les conditions dans lesquelles les approches data-driven peuvent transformer les modes de gestion de l'eau.

Ce cadre s'appuie sur trois corpus théoriques complémentaires. Le Management and Transition Framework de Pahl-Wostl (2010) offre une lecture systémique des régimes de gouvernance et de leurs dynamiques de transition. L'architecture de Smart Water Management proposée par Dai et al. (2025) structure la dimension technologique autour des flux de données et des capacités d'analyse. Enfin, le cadre de l'OCDE (2015) apporte une base normative fondée sur l'efficacité, l'efficience et la coordination des acteurs publics.

La combinaison de ces approches permet de dépasser une lecture fragmentée des systèmes hydriques en articulant dimensions institutionnelles, technologiques et organisationnelles, tout en intégrant la résilience comme objectif transversal. Elle repose sur l'idée que la performance des systèmes hydriques dépend moins de la seule disponibilité des technologies que de leur intégration dans des dispositifs de gouvernance capables d'en assurer l'appropriation.

Tableau 1. Cadre conceptuel d'analyse de la gouvernance hydrique data-driven

Dimension	Variables clés	Références théoriques
Institutionnelle	Cadre légal, coordination multi-niveaux, arrangements organisationnels, engagement des parties prenantes	OCDE (2015) ; Pahl-Wostl (2020) ; Huitema et al. (2009)
Technologique	Architecture IoT-IA à 5 couches, jumeaux numériques, interopérabilité des données, cybersécurité	Dai et al. (2025) ; Sit et al. (2020) ; Fuller et al. (2020)
Organisationnelle	Compétences data science, gestion du changement, culture data-driven, PPP, écosystème d'innovation	Asian Development Bank (2021) ; Pahl-Wostl (2010) ; Dubois & Gadde (2002)
Résilience	Capacités WARATA, sécurité hydrique, diversification des sources, adaptation climatique, gestion des risques	Butler et al. (2017) ; Grey & Sadoff (2007) ; Pahl-Wostl (2020)

Source : Synthèse de l'auteur, à partir de la revue de littérature (2024)

À partir de cette grille, chaque modèle national est analysé selon quatre axes principaux. Le premier concerne la robustesse du cadre institutionnel de gouvernance, en particulier la capacité à coordonner les acteurs et à structurer les processus décisionnels. Le deuxième porte sur le niveau de maturité technologique, entendu comme le degré d'intégration des données et des outils d'intelligence artificielle dans les systèmes hydriques. Le troisième s'intéresse à la dimension organisationnelle, notamment la capacité des institutions à accompagner la transformation digitale. Le quatrième, enfin, évalue le niveau de résilience atteint face aux chocs hydriques et climatiques.

L'apport principal de ce cadre réside dans l'articulation de perspectives souvent traitées séparément. Il permet de croiser les apports des sciences de gestion, de l'ingénierie des systèmes et des sciences de l'environnement, afin de proposer une lecture intégrée des transformations en cours dans le domaine de la gouvernance de l'eau.

4. MÉTHODOLOGIE

Cette section présente le dispositif méthodologique déployé pour répondre à la question de recherche formulée dans l'introduction, à savoir les conditions dans lesquelles l'intelligence artificielle et la valorisation des données peuvent contribuer à l'émergence d'une gouvernance hydrique résiliente. La démarche adoptée s'inscrit dans une approche qualitative comparative, mobilisant la méthode des études de cas multiples telle que formalisée par Yin (2018). Ce choix se justifie par la nature exploratoire de l'objet étudié, qui appelle une compréhension fine des mécanismes à l'œuvre dans des contextes institutionnels et technologiques contrastés, plutôt qu'une mesure quantitative de relations causales prédéfinies. Le protocole de recherche s'articule en cinq étapes séquentielles, conçues de manière à assurer la cohérence d'ensemble de la démarche et la traçabilité des choix opérés à chaque phase : positionnement épistémologique, sélection des cas, collecte des données, analyse intra-cas et inter-cas, et contrôle de la qualité. Le Tableau 2 ci-dessous offre une vue synthétique de ce dispositif, en précisant pour chaque composante le choix méthodologique retenu et sa justification.

Tableau 2 : Synthèse du design méthodologique

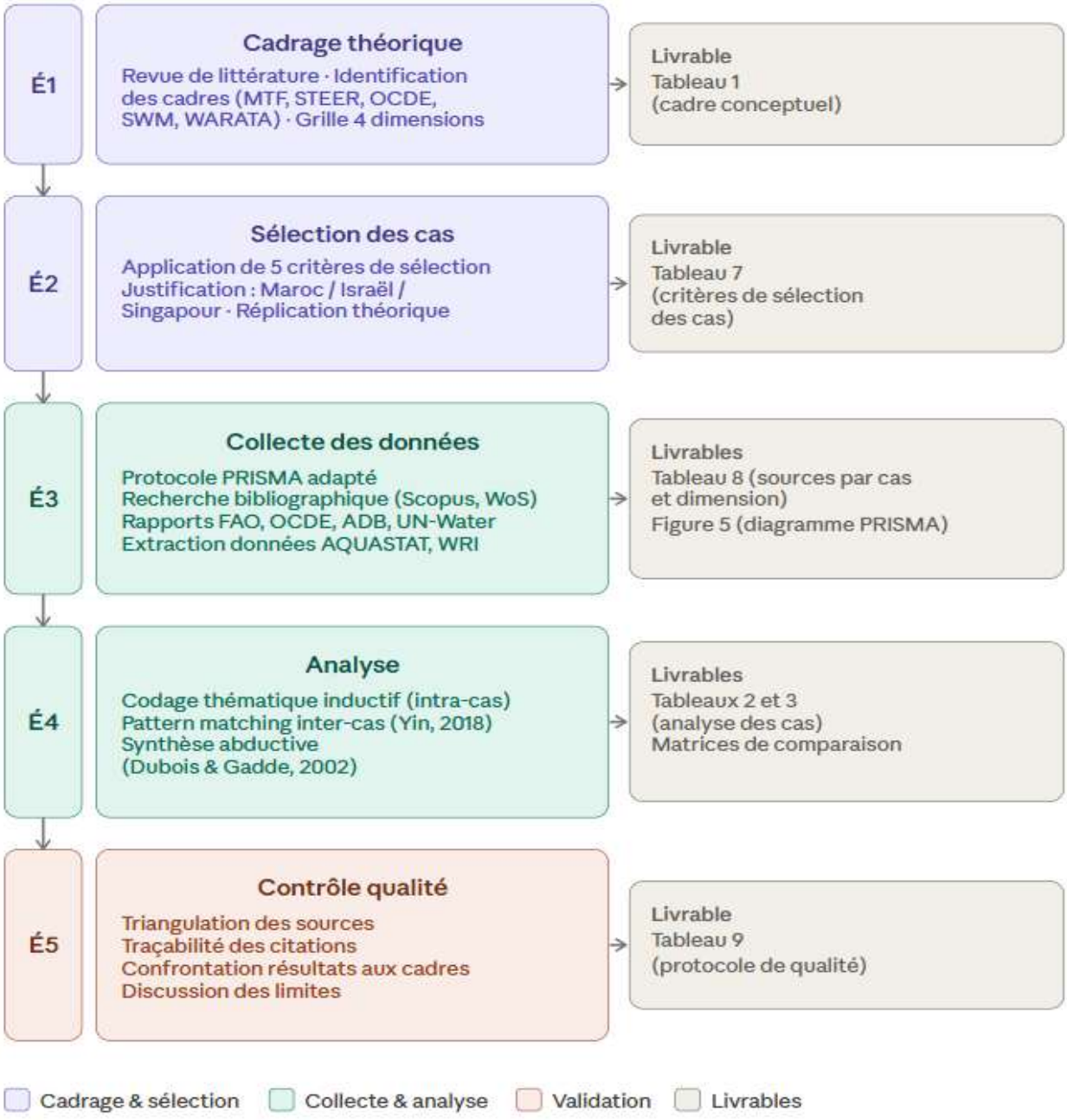
Composante	Choix méthodologique	Justification
Paradigme épistémologique	Interprétativisme	Compréhension contextuelle de phénomènes sociotechniques complexes (Guba & Lincoln, 1994)
Approche	Qualitative exploratoire et comparative	Identification de facteurs explicatifs dans des contextes contrastés
Stratégie de recherche	Étude de cas multiples (3 cas)	Réplication théorique : contrainte commune (rareté), configurations différenciées (Yin, 2018)
Unité d'analyse	Système national de gouvernance hydrique (cadre institutionnel + architecture technologique + dispositifs organisationnels)	Cohérence avec le cadre conceptuel à 4 dimensions (Tableau 1)
Sources de données	Littérature indexée (Scopus, WoS), rapports institutionnels (FAO, OCDE, ADB, UN-Water), documents de politique publique, bases statistiques (AQUASTAT, WRI)	Triangulation des sources pour renforcer la validité interne (Lincoln & Guba, 1985)
Période couverte	2010–2025 (littérature) ; données factuelles les plus récentes disponibles	Couverture de l'émergence du paradigme data-driven dans le secteur hydrique
Méthode d'analyse	Codage thématique inductif (intra-cas) + pattern matching inter-cas (Yin, 2018) + abduction (Dubois & Gadde, 2002)	Combinaison systématique de description, comparaison et théorisation
Critères de qualité	Crédibilité, transférabilité, fiabilité, confirmabilité (Lincoln & Guba, 1985)	Protocole formalisé, triangulation, traçabilité des sources

Source : Élaboration de l'auteur (2026)

Afin de rendre plus explicite l'articulation entre ces différentes composantes et de répondre à l'exigence de transparence méthodologique qui caractérise les recherches qualitatives comparatives, la Figure 2 présente

le déroulement séquentiel du protocole de recherche. Ce schéma retrace les cinq étapes constitutives de la démarche, depuis le cadrage théorique initial jusqu'au contrôle de la qualité des résultats, en précisant pour chaque étape les activités réalisées, les outils mobilisés et les livrables produits. Cette formalisation vise à garantir la traçabilité du processus de recherche et à faciliter sa réplicabilité dans des contextes similaires.

Figure 2. Processus méthodologique de la recherche



Source : Élaboration de l'auteur (2026)

Chacune de ces étapes est détaillée dans les sous-sections suivantes, qui explicitent les choix opérés et les procédures appliquées à chaque phase du processus.

4.1. Positionnement épistémologique et approche retenue

Cette recherche s'inscrit dans une posture interprétativiste, privilégiant la compréhension approfondie de phénomènes contextualisés plutôt que la recherche de régularités universelles (Guba & Lincoln, 1994). L'approche adoptée est qualitative, à la fois exploratoire et comparative, et repose sur la méthode des études de cas multiples telle que formalisée par Yin (2018). Ce choix se justifie par la nature de l'objet étudié : la gouvernance hydrique fondée sur les données constitue un phénomène émergent, encore insuffisamment stabilisé sur le plan théorique, dont l'analyse appelle une compréhension fine des mécanismes à l'œuvre dans des contextes institutionnels et technologiques contrastés, plutôt qu'une mesure quantitative de relations causales prédéfinies. L'approche retenue s'inscrit ainsi dans la tradition des études comparatives de gouvernance de l'eau, qui insistent sur l'importance de cadres analytiques explicites et de protocoles homogènes afin de garantir la comparabilité des cas (Özerol et al., 2018).

Le choix de trois cas : Maroc, Israël, Singapour ; répond à une logique de réplication théorique, telle que définie par Yin (2018). Celle-ci suppose que chaque cas soit sélectionné non pas de manière aléatoire, mais en fonction de résultats anticipés distincts, explicables par le cadre théorique mobilisé. Dans le cas présent, les trois pays partagent une contrainte commune : un stress hydrique structurel, tout en présentant des niveaux de maturité digitale et des configurations institutionnelles nettement contrastés. Cette variation contrôlée permet de tester un ensemble de propositions théoriques dérivées du cadre conceptuel présenté dans la section 3, et d'identifier les facteurs qui discriminent les modèles performants des modèles encore émergents. Le Tableau 3 formalise ces propositions, en précisant pour chacune son fondement théorique et la dimension du cadre conceptuel à laquelle elle se rattache.

Tableau 3. Propositions théoriques soumises à l'analyse comparative

N°	Proposition théorique	Fondement théorique	Dimension
P1	La centralisation de la gouvernance hydrique, ou l'existence d'un mécanisme de coordination effective entre les acteurs du secteur, favorise l'intégration des données et améliore la cohérence décisionnelle	Pahl-Wostl (2020) ; OCDE (2015) ; Huitema et al. (2009)	Institutionnelle
P2	Le déploiement d'une architecture technologique intégrée (IoT-IA-jumeaux numériques) constitue une condition nécessaire mais non suffisante à l'émergence d'une gouvernance hydrique data-driven	Dai et al. (2025) ; Fuller et al. (2020) ; Sit et al. (2020)	Technologique
P3	La disponibilité de compétences spécialisées en data science et l'existence d'un écosystème d'innovation structuré conditionnent l'appropriation effective des technologies par les institutions hydriques	ADB (2021) ; Zaryouh & Fahmi (2024) ; Dubois & Gadde (2002)	Organisationnelle
P4	L'intégration de l'IA dans la chaîne décisionnelle hydrique permet de faire évoluer les systèmes d'un mode réactif vers un mode anticipatif, renforçant ainsi la résilience face aux chocs climatiques et hydriques	Butler et al. (2017) ; Grey & Sadoff (2007) ; Pahl-Wostl (2020)	Résilience

Source : Élaboration de l'auteur à partir du cadre conceptuel (Tableau 1)

Ces propositions ne constituent pas des hypothèses au sens positiviste, mais des repères analytiques inscrits dans une démarche abductive, orientant l'interprétation des données (Dubois & Gadde, 2002). Leur confrontation aux trois cas étudiés vise à en apprécier la validité et à les ajuster si nécessaire.

L'analyse porte sur le système national de gouvernance hydrique, appréhendé de manière systémique à travers trois dimensions : institutionnelle, technologique et organisationnelle. Ce choix permet d'examiner leurs interactions et leur contribution à la résilience globale.

Le protocole d'étude de cas, défini en amont selon Yin (2018), repose sur quatre éléments : des questions issues du cadre théorique, des sources de données diversifiées, une grille de collecte commune et une analyse par *pattern matching*. Son application uniforme garantit la rigueur et la comparabilité des résultats.

4.2. Sélection des cas et critères retenus

La sélection des cas constitue une étape déterminante dans la méthode des études de cas multiples, dans la mesure où elle conditionne la portée et la validité des résultats (Yin, 2018). Conformément à la logique de réplication théorique exposée dans la section précédente, les trois pays retenus — Maroc, Israël et Singapour — ont été choisis non pas selon une logique d'échantillonnage statistique, mais en fonction de leur capacité à produire des résultats contrastés, explicables par le cadre théorique mobilisé. La sélection repose sur l'application systématique de cinq critères, définis préalablement à la collecte des données et documentés dans le protocole d'étude de cas.

La sélection repose sur cinq critères définis préalablement à la collecte et documentés dans le protocole : (a) niveau de stress hydrique élevé ou critique (ODD 6.4.2 > 75 %), (b) existence d'une stratégie nationale de l'eau formalisée, (c) engagement documenté dans la transformation digitale du secteur hydrique à des degrés de maturité contrastés, (d) disponibilité de données secondaires de qualité suffisante, (e) pertinence de la configuration comparative entre un pays émergent et deux économies avancées. Le Tableau 4 vérifie systématiquement la conformité de chaque pays à ces critères.

Tableau 4. Vérification des critères de sélection des cas

Critère de sélection	Maroc	Israël	Singapour
(a) Stress hydrique élevé ou critique (ODD 6.4.2 > 75 %)	Oui — Élevé (> 75 %). Disponibilité < 600 m³/hab./an	Oui — Critique (> 100 %). Disponibilité ~ 91 m³/hab./an hors dessalement	Oui — Critique (> 100 %). Disponibilité ~ 105 m³/hab./an, ressources locales très faibles
(b) Stratégie nationale de l'eau formalisée	Oui — Plan National de l'Eau (PNE 2020–2050) ; PNAEPI 2020–2027 (143 Mds MAD)	Oui — Politique nationale intégrée ; stratégie de diversification (dessalement, REUT)	Oui — Stratégie des « quatre robinets nationaux » (Four National Taps) ; PUB Master Plan
(c) Engagement documenté dans la transformation digitale du secteur eau	Partiel — Stratégie Maroc Digital 2030 (généraliste) ; initiatives pilotes isolées dans le secteur eau (deep learning nappes)	Oui — Centre de contrôle national Mekorot ; IA intégrée aux opérations ; écosystème 130+ startups eau-tech	Oui — Smart Water Grid ; > 50 000 capteurs IoT ; jumeaux numériques Changi WRP ; cloud gouvernemental

(d) Disponibilité de données secondaires de qualité	Oui — Littérature académique, rapports FAO/BM/FMI, données AQUASTAT, documents ministériels	Oui — Littérature abondante, rapports GWI/OCDE, données Mekorot, presse spécialisée	Oui — Rapports PUB/UN-Water, études Jacobs/NRF, littérature SWM, données AQUASTAT
(e) Pertinence comparative (contraste des configurations)	**Modèle émergent fragmenté** — Gouvernance multi-acteurs ; digitalisation embryonnaire ; déficit compétences data	**Modèle innovant-adaptatif** — Acteur dominant (Mekorot) ; écosystème startup ; IA opérationnelle ; résilience testée	**Modèle intégré-anticipatif** — Centralisation PUB ; digitalisation systémique ; jumeaux numériques ; anticipation 5 jours

Source : Élaboration de l'auteur à partir de FAO AQUASTAT (2024), World Bank WDI (2024), documents de politique publique nationaux

L'application systématique de ces critères confirme la pertinence des trois cas retenus. Leur conformité aux critères (a) à (d) assure la comparabilité des situations de départ — les trois pays font face à un stress hydrique structurel et disposent de stratégies nationales documentées —, tandis que le critère (e) garantit la variation nécessaire à la réplication théorique. Le Maroc représente un modèle en émergence, confronté à des contraintes institutionnelles et technologiques importantes, où la digitalisation du secteur hydrique reste fragmentaire. Israël incarne un modèle innovant et adaptatif, porté par un acteur central structurant et un écosystème technologique dynamique, ayant démontré sa résilience dans des conditions de crise réelle. Singapour illustre le modèle le plus intégré, caractérisé par une centralisation complète de la gouvernance, une digitalisation systémique de l'ensemble du cycle de l'eau et des capacités d'anticipation avancées.

Cette diversité de configurations constitue précisément la condition méthodologique qui permet de tester les propositions théoriques formulées dans la section 4.1 et d'identifier, par contraste, les facteurs discriminants de la performance des systèmes de gouvernance hydrique fondés sur les données. La sous-section suivante précise les sources de données mobilisées pour chaque cas et la procédure de collecte mise en œuvre.

4.3. Collecte des données : protocole et sources

La collecte des données constitue une étape déterminante dont la rigueur conditionne la crédibilité des résultats. Conformément aux recommandations de Page et al. (2021), un protocole de recherche documentaire a été défini en amont afin d'assurer la traçabilité, la reproductibilité et l'exhaustivité relative du corpus. Ce protocole, présenté dans le Tableau 5, précise les bases interrogées, la période couverte, les langues retenues, les chaînes de recherche et les champs d'interrogation.

La stratégie de recherche a été appliquée de manière itérative sur deux bases académiques majeures, Scopus et Web of Science, en combinant trois chaînes complémentaires. La première porte sur les technologies de gestion intelligente de l'eau (IoT, IA, machine learning), la deuxième sur la gouvernance hydrique dans sa dimension digitale (data-driven, jumeaux numériques, transformation digitale), et la troisième introduit une dimension géographique centrée sur les trois pays étudiés. Cette démarche a été complétée par une recherche manuelle dans les références des articles sélectionnés (snowballing) ainsi que par l'analyse des rapports d'organisations internationales spécialisées.

Tableau 5. Protocole de recherche documentaire

Paramètre	Détail
Bases de données	Scopus ; Web of Science (WoS)
Période couverte	2010–2025
Langues	Anglais, français
Chaîne de recherche 1	*("smart water management" OR "intelligent water") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "IoT")*
Chaîne de recherche 2	*("water governance" OR "water policy") AND ("data-driven" OR "digital twin" OR "digital transformation")*
Chaîne de recherche 3	*("water management") AND ("Morocco" OR "Israel" OR "Singapore")*
Champs interrogés	Titre, résumé, mots-clés
Compléments	Recherche manuelle dans les références des articles retenus (snowballing) ; rapports institutionnels FAO, OCDE, ADB, UN-Water, Banque mondiale, FMI

Source : Élaboration de l'auteur (2025)

Les références identifiées ont ensuite été soumises à un processus de sélection en deux étapes, fondé sur des critères d'inclusion et d'exclusion définis préalablement et appliqués de manière systématique. La première étape a porté sur la lecture des titres et des résumés, permettant d'écarter les références manifestement hors champ. La seconde étape a consisté en une lecture intégrale des textes retenus, au terme de laquelle seules les publications répondant à l'ensemble des critères d'inclusion ont été intégrées au corpus final. Le Tableau 6 formalise ces critères.

Tableau 6. Critères d'inclusion et d'exclusion

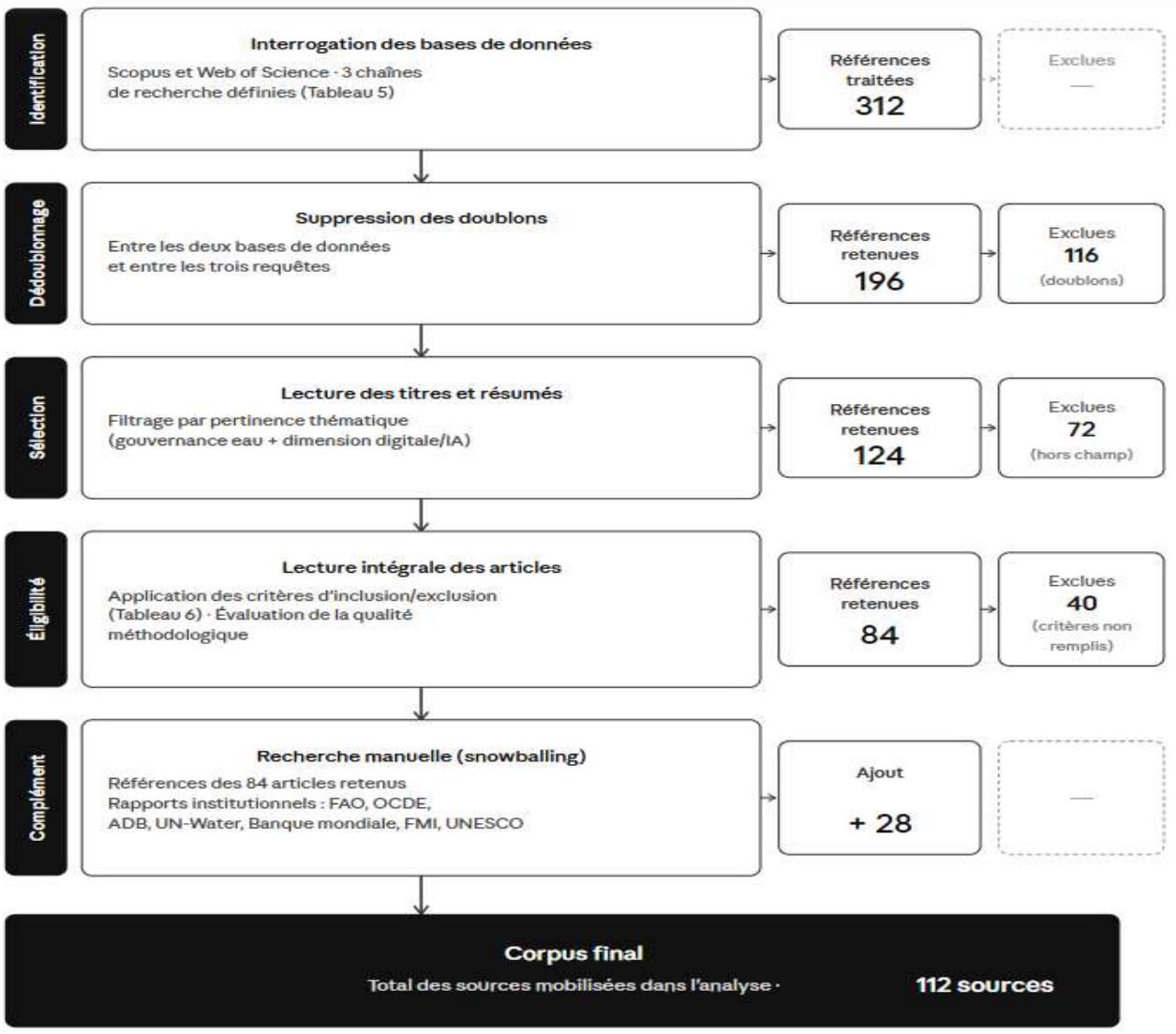
Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
Articles publiés dans des revues à comité de lecture (peer-reviewed)	Articles sans comité de lecture (working papers, preprints non validés)
Publications couvrant la période 2010–2025	Publications antérieures à 2010
Études portant sur la gouvernance de l'eau, l'IA appliquée à l'eau, les jumeaux numériques hydriques ou la gestion data-driven de la ressource	Études portant exclusivement sur l'agriculture, l'énergie ou l'industrie sans lien explicité avec la gouvernance hydrique
Études empiriques, revues systématiques, cadres conceptuels, rapports d'organisations internationales reconnues	Éditoriaux, résumés de conférences sans texte intégral, lettres à l'éditeur, documents à vocation promotionnelle
Publications en anglais ou en français	Publications dans d'autres langues
Rapports d'organisations internationales reconnues (FAO, OCDE, ADB, UN-Water, Banque mondiale, FMI, UNESCO)	Rapports d'organisations non identifiées, sources non vérifiables ou documents commerciaux

Source : Élaboration de l'auteur (2026)

Le processus de sélection de la littérature a été conduit conformément aux lignes directrices PRISMA 2020 (Page et al., 2021), adaptées au contexte d'une recherche qualitative comparative. La Figure 5 retrace les

différentes phases de ce processus, depuis l'identification initiale des références jusqu'à la constitution du corpus final, en précisant à chaque étape le nombre de références traitées et les motifs d'exclusion. Ce diagramme permet de garantir la transparence et la reproductibilité du processus de collecte.

Figure 3. Diagramme de flux du processus de sélection de la littérature (adapté de PRISMA 2020)



Source : Adapté de Page et al. (2021) — PRISMA 2020. Élaboration de l'auteur

Le corpus final se compose ainsi de 112 sources, dont 84 articles académiques issus du processus systématique de sélection et 28 documents complémentaires (rapports d'organisations internationales, documents de politique publique, données statistiques). Cette double alimentation — littérature académique et sources institutionnelles — répond à l'exigence de triangulation des sources, nécessaire pour renforcer la crédibilité des résultats dans une recherche qualitative (Lincoln & Guba, 1985).

Afin de rendre explicite la couverture du corpus par cas et par dimension du cadre conceptuel, le Tableau 7 présente une matrice croisant les types de sources mobilisées avec les trois pays étudiés et les quatre dimensions analytiques. Cette matrice permet de vérifier que chaque cellule du cadre conceptuel est

effectivement alimentée par des sources identifiables, condition essentielle à la robustesse de l'analyse comparative.

Tableau 7. Matrice des sources mobilisées par cas et par dimension du cadre conceptuel

Dimension	Type de source	Maroc	Israël	Singapour
Institutionnelle	Litt. académique	Ouhbi & Boudhar (2025) ; Zaryouh & Fahmi (2024)	Özerol et al. (2018) ; Pahl-Wostl (2020)	Jiménez et al. (2020) ; Dai et al. (2025)
	Rapports instit.	Min. Équipement (2022) ; FMI (2022) ; FAO (2024)	GWI (2022) ; OCDE (2015, 2018)	UN-Water (2023, 2024) ; ADB (2021)
	Doc. pol. publique	Loi 36-15 ; PNE 2020–2050 ; PNAEPI	Politique nationale eau ; stratégie Mekorot	PUB Master Plan ; Four National Taps
Technologique	Litt. académique	Zaryouh & Fahmi (2024) ; Ouhbi & Boudhar (2025)	Sit et al. (2020) ; Fuller et al. (2020)	Dai et al. (2025) ; Fuller et al. (2020) ; Iancu et al. (2020)
	Rapports instit.	DPA (2025) ; Banque mondiale (2024)	Israel Trade (2025) ; GWI (2022)	PUB/Jacobs (2022) ; UN-Water (2023)
	Données stat.	AQUASTAT ; WRI Aqueduct	AQUASTAT ; WRI Aqueduct	AQUASTAT ; WRI Aqueduct ; WDI
Organisationnelle	Litt. académique	Zaryouh & Fahmi (2024)	Dubois & Gadde (2002) ; Pahl-Wostl (2010)	ADB (2021) ; Pahl-Wostl (2010)
	Rapports instit.	Banque mondiale (2024) ; DPA (2025)	Israel Trade (2025) ; GWI (2022)	ADB (2021) ; UN-Water (2023)
Résilience	Litt. académique	Ouhbi & Boudhar (2025) ; Butler et al. (2017)	Grey & Sadoff (2007) ; Pahl-Wostl (2020)	Butler et al. (2017) ; Dai et al. (2025)
	Rapports instit.	DGM (2024) ; FAO (2024, 2025) ; FMI (2022)	Israel Trade (2025) ; OCDE (2015)	UN-Water (2023, 2024) ; UNESCO (2024)
	Données stat.	AQUASTAT ; DGM ; WRI	AQUASTAT ; WDI	AQUASTAT ; WDI

Source : Élaboration de l'auteur (2026)

L'examen de cette matrice confirme que l'ensemble des cellules analytiques est couvert par au moins deux types de sources distinctes, ce qui satisfait l'exigence de triangulation formulée dans le protocole de qualité (section 4.5). La dimension institutionnelle bénéficie de la couverture la plus dense, alimentée à la fois par la littérature académique, les rapports d'organisations internationales et les documents législatifs et stratégiques des trois pays. La dimension organisationnelle, plus difficile à documenter à partir de sources secondaires, repose sur un nombre plus restreint de références, ce qui constitue une limite reconnue de l'étude. La sous-section suivante détaille la méthode d'analyse appliquée à ce corpus.

4.4. Méthode d'analyse des données

L'analyse des données s'organise en trois étapes articulées. La première consiste en un codage thématique inductif appliqué à chaque cas national (analyse intra-cas). Les données collectées ont été systématiquement codées selon la grille présentée dans le Tableau 8, qui décline les quatre dimensions du cadre conceptuel en variables opérationnelles et en indicateurs observables. Ce codage a permis de structurer les informations de manière homogène pour les trois cas, condition nécessaire à la comparabilité des analyses.

Tableau 8. Grille de codage thématique

Dimension	Variables codées	Indicateurs observables
Institutionnelle	Degré de centralisation ; coordination inter-acteurs ; cadre légal ; engagement parties prenantes	Nombre d'acteurs impliqués ; existence d'une entité de coordination ; cadre réglementaire spécifique aux données hydriques ; mécanismes formalisés de concertation
Technologique	Architecture de données ; déploiement IoT ; intégration IA ; jumeaux numériques ; cybersécurité	Nombre de couches SWM déployées ; capteurs actifs (estimation) ; type d'algorithmes IA utilisés ; présence de digital twins opérationnels ; protocoles de sécurité
Organisationnelle	Compétences data science ; écosystème d'innovation ; partenariats public-privé ; gestion du changement	Formations spécialisées existantes ; nombre de startups eau-tech ; partenariats R&D documentés ; dispositifs d'accompagnement du changement
Résilience	Diversification des sources ; capacité prédictive ; réponse aux chocs ; réutilisation des eaux usées	Nombre de sources d'approvisionnement ; horizon de prévision (jours) ; résilience testée en conditions réelles ; taux de REUT

Source : Élaboration de l'auteur à partir du cadre conceptuel (Tableau 1)

La deuxième étape mobilise la technique du pattern matching (Yin, 2018), consistant à confronter les configurations observées dans chaque cas aux configurations attendues au regard des quatre propositions théoriques formulées dans le Tableau 8. Concrètement, pour chaque proposition, les indicateurs codés lors de l'étape précédente sont comparés entre les trois cas, permettant d'identifier les convergences (schémas partagés par les modèles performants), les divergences (facteurs discriminants) et les conditions limites (facteurs contextuels affectant la validité d'une proposition). Les résultats de cette confrontation systématique sont synthétisés dans les Tableaux 11 et 12 de la section 6.

La troisième étape procède par abduction (Dubois & Gadde, 2002), en alternant entre les résultats empiriques issus du pattern matching et les cadres théoriques mobilisés, afin de formuler le modèle conceptuel HYDRA-Gov (section 8). Cette démarche itérative permet de dépasser la seule description des cas pour produire une proposition théorique nouvelle, ancrée dans les données observées mais enrichie par les apports de la littérature. Les facteurs clés de succès, les contraintes et les conditions de transférabilité identifiés constituent les composantes du modèle proposé.

4.5. Dispositifs de validité et de fiabilité

La rigueur d'une recherche qualitative ne se mesure pas aux mêmes critères que celle d'une recherche quantitative. Conformément aux recommandations de Lincoln et Guba (1985), quatre critères de qualité ont été retenus — crédibilité, transférabilité, fiabilité et confirmabilité — et opérationnalisés à travers des dispositifs concrets, détaillés dans le Tableau 9.

Tableau 9. Protocole de qualité de la recherche

Critère de qualité	Définition	Dispositifs mis en œuvre
Crédibilité (validité interne)	Degré de confiance dans la véracité des résultats	Triangulation des sources (3 types : littérature académique, rapports institutionnels, données statistiques) ; cadre conceptuel explicite (Tableau 1) ; codage systématique (Tableau 8) ; confrontation aux propositions théoriques P1–P4 (Tableau 7)
Transférabilité (validité externe)	Possibilité d'appliquer les résultats à d'autres contextes	Réplication théorique sur 3 cas contrastés (Yin, 2018) ; description dense de chaque cas (section 5) ; explicitation des conditions de contexte (Tableau 8) ; discussion des limites de transférabilité (section 7.3)
Fiabilité (fidélité)	Possibilité de reproduire la démarche et d'obtenir des résultats cohérents	Protocole d'étude de cas formalisé (section 4.1) ; protocole PRISMA documenté avec diagramme de flux (Figure 5) ; grille de codage explicite (Tableau 12) ; traçabilité complète des sources (Tableau 11)
Confirmabilité (objectivité)	Degré auquel les résultats reflètent les données plutôt que les biais du chercheur	Chaîne d'évidence documentée (données → codage → pattern matching → modèle) ; tableaux de synthèse inter-cas (Tableaux 3, 4) ; ancrage systématique des interprétations dans la littérature ; explicitation des limites (section 7.3)

Source : Adapté de Lincoln & Guba (1985). Élaboration de l'auteur (2025)

La principale limite de ce dispositif réside dans l'absence de données primaires (entretiens, observations directes), qui ne permet pas de capturer l'intégralité des dynamiques organisationnelles et politiques à l'œuvre dans chaque cas. Cette contrainte, inhérente aux recherches de nature documentaire, est explicitement reconnue et constitue une piste d'approfondissement identifiée dans les perspectives de recherche (section 9.3).

5. PRÉSENTATION DES CAS NATIONAUX

Afin d'éclairer la comparaison entre les trois cas étudiés, il est utile de présenter un ensemble d'indicateurs synthétiques permettant d'appréhender à la fois les contraintes hydriques, les choix stratégiques et le niveau d'intégration des technologies numériques. Le tableau suivant propose une lecture croisée du Maroc, d'Israël et de Singapour selon des variables clés relatives à la disponibilité de la ressource, à la pression exercée sur les systèmes hydriques, ainsi qu'au degré de transformation digitale du secteur de l'eau. Cette mise en perspective vise à objectiver les écarts structurels entre les trois pays et à situer leur niveau respectif de maturité en matière de gouvernance hydrique fondée sur les données.

Tableau 10. Indicateurs hydriques et digitaux comparés (Maroc, Israël, Singapour)

Indicateur	Maroc	Israël	Singapour
Eau renouvelable/hab. (m^3/an)	< 600	~ 91 (Hors dessalement)	~ 105 (Ressources locales très faibles)
Stress hydrique (ODD 6.4.2)	Élevé (> 75 %)	Critique (> 100 %)	Critique (> 100 %)

		(Dépendance forte aux ressources non conventionnelles)	*(Dépendance forte aux ressources non conventionnelles)*
Part agriculture prélèvements	~ 87 %	~ 50-55 %	Négligeable
Réutilisation eaux usées	~ < 5 %	~ 90 %	~ 40 % (NEWater)
Pertes réseaux (eau non-facturée)	~ 30–36 %	< 3 %	~ 5 %
Dessalement (part approvisionnement)	En forte expansion (objectif > 1 milliard m³/an)	~ 80 %	~ 25 %
Niveau de digitalisation du secteur de l'eau	Faible	Elevée	Très élevée
Capteurs IoT déployés (estimation)	Limité	> 10 000	> 50 000
Nombre de barrages	154 grands (2024) + 140 petits	Israël a des réservoirs (mais faible dépendance)	17 réservoirs

Source : Compilation à partir de FAO AQUASTAT (2024), World Bank WDI (2024), Ministère de l'Équipement et de l'Eau du Maroc (2023) , et estimations issues de la littérature sectorielle

L'analyse de ces indicateurs met en évidence des contrastes significatifs entre les trois modèles. Alors que le Maroc se caractérise par une pression croissante sur ses ressources et un niveau de digitalisation encore limité, Israël et Singapour apparaissent comme des systèmes fortement optimisés, reposant sur une maîtrise avancée des technologies et une diversification des sources d'approvisionnement. Ces deux pays, confrontés à une rareté encore plus prononcée, ont développé des stratégies combinant réutilisation des eaux, dessalement et pilotage intelligent des réseaux, leur permettant de réduire considérablement les pertes et d'améliorer l'efficience globale du système.

Au-delà des différences de contexte, ces résultats suggèrent que la performance hydrique ne dépend pas uniquement de la disponibilité des ressources naturelles, mais aussi de la capacité à mobiliser des outils technologiques et organisationnels adaptés. Ils confirment ainsi l'intérêt d'une analyse approfondie des trajectoires nationales, afin d'identifier les leviers susceptibles d'accompagner la transition vers une gouvernance hydrique plus résiliente dans le cas marocain.

5.1. Le Maroc : contraintes structurelles et amorce de la digitalisation

5.1.1. Situation hydrique et enjeux

Le Maroc fait face à une intensification des contraintes hydriques qui s'inscrivent désormais dans une tendance structurelle. L'année 2023 a été marquée par un épisode de sécheresse particulièrement sévère, avec des précipitations très inférieures à la moyenne nationale et un déficit pluviométrique estimé à près de 48 % (DGM, rapport institutionnel interne, données nationales, 2024). Cette situation s'explique en partie par la

variabilité climatique liée à l'Oscillation Nord-Atlantique, mais également par des facteurs géographiques, notamment le rôle du Haut Atlas, qui limite la pénétration des masses d'air humide vers les régions du sud et du sud-est (Ouhbi & Boudhar, 2025).

Sur le long terme, la disponibilité en eau connaît une baisse continue. Elle est passée d'environ 18 milliards de m³ par an sur la seconde moitié du XXe siècle à près de 13,9 milliards sur la période récente, traduisant une dégradation progressive des ressources mobilisables. Cette évolution confirme le caractère durable de la contrainte hydrique et renforce la vulnérabilité des territoires les plus exposés.

Les impacts économiques sont particulièrement sensibles dans le secteur agricole, qui représente près de 13 % du PIB et mobilise environ un tiers de la population active. Ce secteur concentre à lui seul près de 87 % des prélèvements d'eau, ce qui accentue la pression sur la ressource. La baisse de la production céréalière observée en 2024, supérieure à 40 %, a entraîné un recours accru aux importations (FAO, 2024). Par ailleurs, la surexploitation des nappes phréatiques constitue un facteur aggravant, illustré par certains bassins où le développement de cultures intensives a entraîné une augmentation significative des prélèvements.

5.1.2. Cadre institutionnel et stratégie nationale

Le cadre institutionnel marocain repose sur un ensemble d'acteurs et de dispositifs structurés autour de la loi 36-15 relative à l'eau. Il mobilise notamment les Agences de Bassins Hydrauliques, l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable, ainsi que les régies locales de distribution. Sur le plan stratégique, le Plan National de l'Eau (2020–2050) et le Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et d'Irrigation constituent les principaux instruments d'action publique, avec un investissement global de l'ordre de 143 milliards de dirhams (Ministère de l'Équipement et de l'Eau, 2022).

La gouvernance du secteur demeure marquée par une fragmentation institutionnelle. La répartition des compétences entre les différents acteurs, notamment entre les ministères, les agences de bassin et les opérateurs publics, complique la coordination et limite la circulation de l'information. Cette situation rend plus difficile l'émergence d'une gestion intégrée, fondée sur une vision partagée et sur l'exploitation des données à des fins de pilotage.

5.1.3. État de la digitalisation du secteur hydrique

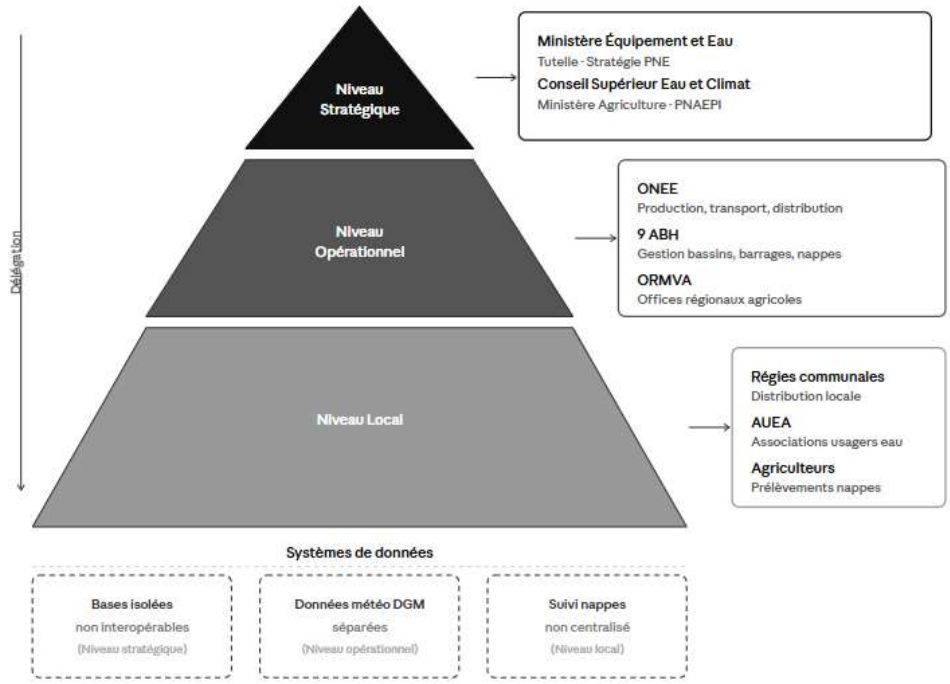
Le Maroc a engagé une dynamique de transformation numérique à travers la stratégie Maroc Digital 2030, qui ambitionne de renforcer la contribution du digital à la croissance économique. Les indicateurs globaux témoignent d'une progression notable, notamment en matière de connectivité et de services numériques. Toutefois, cette dynamique reste encore peu visible dans le secteur de l'eau, où les applications concrètes demeurent limitées et fragmentées.

Les travaux récents mettent en évidence plusieurs contraintes structurelles. L'absence d'une architecture de données unifiée, le manque d'interopérabilité entre les systèmes d'information des différents acteurs institutionnels et le déficit de compétences spécialisées en science des données constituent autant de freins à l'intégration des technologies numériques (Zaryouh & Fahmi, 2024). Si certaines initiatives existent, notamment dans l'utilisation d'outils analytiques avancés pour l'amélioration de la connaissance des ressources hydriques, elles restent ponctuelles et ne s'inscrivent pas encore dans une stratégie globale.

L'un des principaux enjeux réside dans la fragmentation des données. Contrairement à des modèles plus intégrés, le système marocain repose sur une multiplicité de bases d'information peu interconnectées. Les données hydrométéorologiques, les informations relatives aux barrages, les données de distribution ou encore les bases locales sont gérées par des entités distinctes, sans véritable mécanisme d'intégration. Cette

dispersion limite la capacité à produire une vision consolidée du système hydrique et constitue un obstacle majeur à l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle, qui nécessitent des flux de données continus et harmonisés.

Figure 4. Schéma de la gouvernance hydrique au Maroc : acteurs et flux informationnels



Source : Synthèse de l'auteur à partir de la loi 36-15 (2016) et du PNE 2020–2050

Le schéma présenté en Figure 3 illustre cette organisation, marquée par une pluralité d'acteurs et par l'absence de circuits d'information transversaux pleinement opérationnels. Il met en évidence un paradoxe : malgré la présence d'un cadre institutionnel relativement dense, la coordination effective et le partage des données restent insuffisants. L'absence d'une entité centrale de pilotage, capable de jouer un rôle d'intégration, limite ainsi l'émergence d'une gouvernance hydrique fondée sur les données.

Pour autant, les conditions d'une transformation restent réunies. Le développement rapide des infrastructures numériques, l'engagement des pouvoirs publics en faveur du digital et l'ouverture à des partenariats internationaux constituent des leviers importants. Dans ce contexte, la digitalisation du secteur de l'eau apparaît moins comme une question de disponibilité technologique que comme un enjeu de structuration des systèmes de gouvernance et de coordination des acteurs.

5.2. Israël : innovation technologique et gestion de la rareté

5.2.1. Un modèle fondé sur la transformation de la contrainte

Israël constitue un exemple particulièrement illustratif de transformation d'une contrainte naturelle en levier de performance. Avec une disponibilité en eau extrêmement limitée, le pays a progressivement construit un système hydrique reposant sur la diversification des sources et l'intégration avancée des technologies. La réutilisation des eaux usées y atteint des niveaux très élevés, tandis que le dessalement constitue aujourd'hui une composante centrale de l'approvisionnement en eau potable. Parallèlement, l'agriculture repose largement sur des ressources non conventionnelles, ce qui réduit la pression sur les ressources naturelles.

Ce modèle s'inscrit dans une logique de sécurité hydrique, entendue comme la capacité à garantir un accès durable à la ressource tout en maîtrisant les risques associés (Grey & Sadoff, 2007). Il repose sur une combinaison d'investissements technologiques, de politiques publiques cohérentes et d'une forte capacité d'innovation. À cet égard, le secteur de l'eau s'est progressivement structuré autour d'un écosystème dynamique, intégrant opérateurs publics, entreprises technologiques et centres de recherche.

L'entreprise nationale Mekorot joue un rôle central dans cette organisation. Elle a engagé, au cours des dernières années, une modernisation progressive de ses systèmes de gestion, en intégrant des outils numériques permettant d'améliorer la surveillance des réseaux et d'optimiser la distribution. Ces évolutions se traduisent notamment par une réduction significative des pertes et une meilleure maîtrise des flux, témoignant d'une gestion plus efficiente du système hydrique.

5.2.2. Architecture IA et centre de contrôle centralisé

L'un des traits distinctifs du modèle israélien réside dans le degré d'intégration des systèmes d'information et des dispositifs de pilotage. La gestion de l'eau repose sur des infrastructures numériques permettant de collecter, traiter et analyser les données en temps réel, facilitant ainsi une prise de décision plus réactive. Cette organisation s'inscrit dans une logique de Smart Water Management, où les différentes couches technologiques, de la captation des données à l'aide à la décision, sont étroitement articulées (Dai et al., 2025).

Par ailleurs, la cybersécurité constitue une composante pleinement intégrée du système. La protection des infrastructures hydriques est devenue un enjeu stratégique, conduisant à la mise en place de dispositifs de surveillance et de prévention des risques. Cette dimension souligne que la digitalisation du secteur de l'eau s'accompagne de nouveaux défis, qui dépassent la seule question de la performance technique.

Au-delà des aspects technologiques, le modèle israélien repose également sur des mécanismes économiques incitatifs. La tarification de l'eau intègre les coûts réels de production et encourage une gestion rationnelle de la ressource. Associée à des dispositifs de mesure et de suivi de la consommation, cette approche permet d'agir simultanément sur l'offre et sur la demande, contribuant ainsi à l'équilibre du système.

5.3. Singapour : gouvernance centralisée et efficacité opérationnelle

5.3.1. La stratégie des « quatre robinets nationaux »

Singapour constitue l'un des exemples les plus aboutis de gouvernance hydrique intégrée dans un contexte de forte contrainte. Face à une disponibilité très limitée en ressources naturelles, le pays a structuré sa stratégie autour des « quatre robinets nationaux », combinant l'importation d'eau, la collecte locale des eaux pluviales, la réutilisation des eaux usées traitées (NEWater) et le dessalement (UN-Water, 2023). Cette diversification permet de réduire la dépendance à une source unique et de renforcer la capacité du système à faire face aux aléas climatiques ou aux contraintes géopolitiques.

L'un des éléments clés de ce modèle réside dans la centralisation de la gouvernance. Le Public Utilities Board assure la gestion de l'ensemble du cycle de l'eau, de la captation à la distribution et à la réutilisation. Cette organisation unifiée facilite la coordination des décisions et permet une meilleure circulation de l'information. Elle constitue un facteur déterminant dans la capacité du système à intégrer les technologies numériques de manière cohérente.

5.3.2. Digitalisation intégrale et jumeaux numériques

La stratégie singapourienne repose également sur une digitalisation avancée du secteur hydrique. Le système s'appuie sur un réseau dense de capteurs permettant de suivre en temps réel les principaux paramètres de fonctionnement, tels que les débits, la pression ou la qualité de l'eau. Ces données alimentent des dispositifs d'analyse et de modélisation qui contribuent à améliorer la gestion des infrastructures.

Dans cette perspective, le recours aux jumeaux numériques constitue un levier central. Ces outils permettent de simuler le comportement des systèmes hydriques, d'anticiper les dysfonctionnements et d'optimiser les opérations. Ils s'inscrivent dans une logique de gestion prédictive, où les décisions sont prises à partir de modèles dynamiques plutôt que sur la base d'observations a posteriori (Fuller et al., 2020).

6. ANALYSE COMPARATIVE INTER-CAS

L'analyse croisée des trois cas, structurée selon les quatre dimensions du cadre conceptuel (Tableau 1), vise à dépasser la description individuelle des trajectoires nationales pour identifier les facteurs explicatifs de la performance des modèles de gouvernance hydrique fondés sur les données. Chaque sous-section ci-dessous se concentre sur la comparaison analytique des trois cas, les éléments descriptifs détaillés ayant été présentés dans la section 5.

6.1. Dimension institutionnelle : de la fragmentation à l'intégration

La comparaison révèle que le degré de centralisation institutionnelle constitue le facteur le plus fortement associé à la capacité d'intégration des données. Singapour, où le PUB contrôle l'intégralité du cycle de l'eau, présente le niveau d'intégration le plus élevé : les flux informationnels transitent par une entité unique, éliminant les problèmes d'interopérabilité. Israël, sans centralisation formelle, atteint un résultat comparable grâce à la centralité fonctionnelle de Mekorot, qui assure de facto la coordination des données à l'échelle nationale. Le Maroc, en revanche, se distingue par une fragmentation qui empêche l'émergence d'une vision unifiée : les données des ABH, de l'ONEE, des régies et de la DGM coexistent dans des silos non interconnectés.

Ce contraste éclaire la proposition P1 : ce n'est pas la centralisation en tant que telle qui importe, mais l'existence d'un mécanisme effectif de coordination des données. Le modèle israélien montre qu'un acteur dominant peut remplir cette fonction sans réforme institutionnelle globale — une leçon directement pertinente pour le Maroc, où la création d'une entité d'intégration des données (ENIDH) pourrait produire des effets comparables sans remettre en cause l'architecture institutionnelle existante.

6.2. Dimension technologique : trois stades de maturité

L'analyse fait apparaître un gradient de maturité technologique nettement différencié. Singapour a déployé l'ensemble des cinq couches de l'architecture SWM (Figure 1) de manière intégrée, incluant des jumeaux numériques opérationnels capables de s'auto-calibrer par machine learning. Israël excelle sur les couches 4 (analyse intelligente) et 5 (aide à la décision), avec une intégration avancée de l'IA dans les opérations quotidiennes de Mekorot. Le Maroc ne dispose que d'éléments isolés de la couche 1 (capteurs ponctuels) et de la couche 4 (projets pilotes de deep learning), sans architecture unifiée.

Ce gradient confirme la proposition P2 : le cas marocain démontre par la négative que des initiatives technologiques ponctuelles, même pertinentes sur le plan technique, ne produisent pas de transformation systémique en l'absence d'un cadre institutionnel intégrateur (P1) et de compétences dédiées (P3). La technologie opère comme un amplificateur de la capacité institutionnelle, non comme un substitut.

Le tableau suivant synthétise les principaux éléments de cette analyse comparative.

Tableau 11. Synthèse de l'analyse comparative inter-cas

Dimension	Maroc	Israël	Singapour
Gouvernance	Fragmentée, multi-acteurs, faible coordination	Semi-centralisée, acteur dominant (Mekorot)	Centralisée intégrée (PUB unique)
Architecture données	Silos informationnels, pas d'interopérabilité	Centralisée, temps réel, centre national	Intégrée, jumeau numérique complet
Intégration IA	Projets pilotes isolés (deep learning eaux souterraines)	Détection anomalies, optimisation énergétique, cybersécurité IA	Prédiction 5 jours, simulation, contrôle adaptatif ML
Capital humain	Déficit compétences data science	Écosystème 130+ startups, transfert université-industrie	Formation intégrée, e-learning, NRF
Résilience	Faible (réactif, dépendant pluie)	Élevée (adaptatif, testé en crise réelle)	Très élevée (anticipatif, 4 robinets)
PPP et innovation	PPP dessalement en développement	Très développés (Mekorot + startup nation)	Intégrés (PUB + Jacobs + NRF)
Cybersécurité / souveraineté	Cadre DGSSI en cours, non spécifique eau	Avancée (honeypots, SCADA sécurisé)	Cloud gouvernemental, standards élevés

Source : Synthèse de l'auteur à partir des études de cas (2024)

6.3. Dimension organisationnelle : le rôle clé du capital humain

La dimension organisationnelle fait apparaître le contraste le plus marqué entre les modèles performants et le modèle émergent. Singapour et Israël ont développé des dispositifs complémentaires mais convergents : formation intégrée et e-learning au PUB, écosystème de 130 startups eau-tech et transfert université-industrie en Israël. Dans les deux cas, la circulation des compétences entre recherche, innovation et exploitation constitue un moteur central de la performance. Le Maroc cumule un déficit de compétences en data science dans les administrations hydriques, une concurrence du secteur privé qui absorbe les profils qualifiés et l'absence d'écosystème d'innovation sectoriel structuré (Zaryouh & Fahmi, 2024).

Ce constat corrobore fortement la proposition P3, y compris par la négative : le déficit de capital humain spécialisé constitue un frein aussi déterminant que la fragmentation institutionnelle. Il suggère également que l'investissement dans les compétences doit précéder ou au minimum accompagner le déploiement technologique, sous peine de produire des infrastructures sous-exploitées.

6.4. Dimension résilience : du réactif à l'anticipatif

La résilience des trois systèmes peut être positionnée sur un continuum allant du réactif à l'anticipatif. Singapour atteint le stade anticipatif grâce à la combinaison de quatre sources diversifiées, de modèles prédictifs à cinq jours et de jumeaux numériques permettant la simulation de scénarios. Israël se situe au stade adaptatif, sa résilience ayant été concrètement testée lors d'événements de crise, lorsque les systèmes automatisés ont assuré la continuité d'approvisionnement. Le Maroc reste au stade réactif : sa résilience repose sur des infrastructures physiques (barrages, nappes) sans dimension prédictive ni informationnelle.

La proposition P4 présente ainsi un gradient de corroboration qui suggère un mécanisme séquentiel : la transition vers l'anticipation suppose la maturité préalable des dimensions institutionnelle (P1), technologique (P2) et organisationnelle (P3). L'IA ne produit une résilience anticipative que lorsque ces trois conditions sont simultanément réunies. Cette observation a des implications directes pour la feuille de route marocaine.

6.5. Synthèse de l'analyse comparative

L'analyse des quatre dimensions permet de distinguer trois profils de gouvernance hydrique data-driven. Singapour incarne le modèle intégré-anticipatif, Israël le modèle innovant-adaptatif, et le Maroc le modèle fragmenté-réactif. Toutefois, cette classification ne doit pas être lue de manière statique : le Maroc présente des dynamiques de transformation en cours (PNE 2020–2050, Maroc Digital 2030, développement du dessalement) qui ouvrent un espace de transition. L'enjeu ne porte pas sur l'adoption du principe d'une gouvernance data-driven, mais sur ses modalités concrètes de mise en œuvre.

Afin de formaliser les résultats de cette analyse et de dépasser le registre descriptif, le Tableau 12 confronte systématiquement chaque proposition théorique (Tableau 7) aux observations empiriques des trois cas. Pour chaque proposition et chaque pays, un degré de corroboration est attribué selon une échelle qualitative à trois niveaux : corroborée, partiellement corroborée, non corroborée.

Trois constats se dégagent de cette confrontation systématique. Premièrement, les propositions P1 et P3 sont corroborées de manière convergente par les deux cas performants et confirmées par la négative dans le cas marocain, ce qui renforce leur validité analytique. La coordination institutionnelle et le capital humain spécialisé apparaissent comme les deux facteurs les plus discriminants de la performance. Deuxièmement, la proposition P2 est corroborée avec une nuance clé : le cas marocain, où la technologie existe ponctuellement sans produire de transformation systémique, en fournit la démonstration la plus éclairante. Ce résultat confirme que l'efficacité de la technologie dépend de son inscription dans un cadre institutionnel et organisationnel cohérent. Troisièmement, la proposition P4 présente un gradient de corroboration — de la non-vérification au Maroc à la corroboration complète à Singapour — suggérant que la transition vers l'anticipation constitue un processus séquentiel, conditionné par la maturité préalable des trois autres dimensions. Ce constat alimente directement la construction du modèle HYDRA-Gov présenté dans la section 8.

Tableau 12. Confrontation des propositions théoriques aux données empiriques

Proposition	Maroc	Israël	Singapour	Synthèse
P1 — Centralisation / coordination → intégration données	**Non corroborée** — Fragmentation multi-acteurs ; silos informationnels ; absence d'entité d'intégration	**Corroborée** — Centralité fonctionnelle Mekorot ; centre national ; flux unifiés	**Corroborée** — Centralisation PUB ; cycle eau intégralement gouverné par un acteur unique	**Confirmée** par les 2 cas performants ; fragmentation = principal frein
P2 — Technologie = nécessaire mais non suffisante	**Part. corroborée** — Pilotes isolés montrent le potentiel ; pas de montée en échelle sans cadre institutionnel	**Corroborée** — IA efficace car adossée à écosystème innovation + demande institutionnelle	**Corroborée** — Architecture SWM complète indissociable de la gouvernance centralisée	**Confirmée** — Maroc illustre par la négative : technologie seule ne transforme pas

P3 — Compétences et innovation conditionnent l'appropriation	**Corroborée (–)** — Déficit compétences data = frein majeur ; fuite des cerveaux	**Corroborée** — 130+ startups ; transfert université-industrie ; culture innovation	**Corroborée** — Formation PUB ; e-learning ; jumeaux numériques = outils pédagogiques	**Confirmée** dans les 3 cas ; capital humain = facteur discriminant transversal
P4 — IA permet transition réactif → anticipatif	**Non corroborée** — Pas d'IA décisionnelle ; résilience structurelle uniquement (barrages)	**Part. corroborée** — IA opérationnelle ; résilience adaptative testée ; anticipation encore limitée	**Corroborée** — Prédiction 5 jours ; simulation scénarios ; gouvernance anticipative	**Gradient** — Transition anticipative = processus séquentiel conditionné par P1+P2+P3

Source : Élaboration de l'auteur (2025). Vert = corroborée ; jaune = partiellement corroborée ; rouge = non corroborée

Par ailleurs, la comparaison doit être nuancée par les différences structurelles entre les trois pays en termes de taille, de population et de niveau de développement économique. L'intérêt de cette analyse réside moins dans la transposition directe des dispositifs observés que dans l'identification de principes transférables : intégration des données, cohérence institutionnelle, investissement dans les compétences et rôle structurant des partenariats dans l'innovation.

7. RÉSULTATS ET DISCUSSION

7.1. Facteurs clés de succès

L'analyse comparative fait émerger six facteurs clés de succès qui distinguent les modèles performants. Ces facteurs, synthétisés dans le Tableau 13, opèrent comme des conditions nécessaires à la transition vers une gouvernance hydrique résiliente fondée sur les données.

Tableau 13. Facteurs clés de succès de la gouvernance hydrique data-driven

N°	Facteur	Description	Présence (MAR/ISR/SGP)
1	**Unité de pilotage**	Acteur central coordonnant l'intégralité du cycle de l'eau et de ses données	Partiel / Oui / Oui
2	**Architecture données unifiée**	Interopérabilité, plateforme intégrée, standards communs, flux temps réel	Non / Oui / Oui
3	**Investissement R&D continu**	Recherche appliquée, partenariats université-industrie, incubation de startups	Faible / Oui / Oui
4	**Capital humain spécialisé**	Compétences data science + ingénierie hydrique, formation continue, e-learning	Déficit / Oui / Oui
5	**Cadre réglementaire**	Législation données, cybersécurité sectorielle, normes de performance digitale	En cours / Oui / Oui
6	**Diversification sources**	Dessalement, recyclage, réduction dépendance eaux conventionnelles	En cours / Oui / Oui

Source : Synthèse de l'auteur (2024)

7.2. Discussion

En premier lieu, la question de la coordination institutionnelle apparaît déterminante. Les cas de Singapour et d'Israël montrent que l'existence d'un acteur central, ou à défaut d'un mécanisme de coordination efficace, facilite l'intégration des données, la circulation de l'information et l'harmonisation des décisions à différentes échelles de gouvernance. Cette capacité de coordination constitue un élément structurant des systèmes de gouvernance complexes (Pahl-Wostl, 2020), dans la mesure où elle permet de réduire les asymétries informationnelles et d'améliorer la cohérence des politiques publiques. Dans le contexte marocain, cela suggère la nécessité de renforcer les dispositifs d'intégration des données et de pilotage interinstitutionnel, sans pour autant remettre en cause l'ensemble de l'architecture institutionnelle existante, mais plutôt en favorisant des mécanismes de convergence et d'interopérabilité.

En second lieu, la technologie ne constitue pas une condition suffisante en soi. Les expériences observées indiquent que l'intelligence artificielle produit des effets significatifs lorsqu'elle s'inscrit dans un écosystème cohérent, associant innovation technologique, financement durable, capital humain qualifié et demande institutionnelle clairement formulée. Ce constat rejoint les analyses de la Banque asiatique de développement, qui souligne que la transformation digitale implique une évolution conjointe des structures organisationnelles, des procédures décisionnelles et des compétences (Asian Development Bank, 2021). Autrement dit, la performance des dispositifs technologiques dépend largement de leur ancrage dans des logiques institutionnelles et organisationnelles adaptées.

En troisième lieu, la question de la transférabilité des modèles doit être abordée avec prudence. Les différences de contexte, notamment en termes de taille des territoires, de disponibilité des ressources hydriques, de capacités financières et de niveau de développement technologique, limitent la possibilité d'une reproduction directe des expériences étrangères. L'intérêt de la comparaison réside davantage dans l'identification de principes adaptables et de logiques d'action que dans la transposition mécanique de dispositifs spécifiques. À cet égard, le modèle israélien, fondé sur des contraintes hydriques comparables et une composante agricole significative, offre des enseignements particulièrement pertinents, sous réserve d'une adaptation fine aux réalités institutionnelles, économiques et sociales marocaines.

Un quatrième enseignement concerne la temporalité des transformations. Les trajectoires observées montrent que la transition vers des systèmes hydriques digitalisés s'inscrit dans le temps long et ne peut être envisagée comme un processus instantané. Elle repose sur une accumulation progressive d'investissements, d'expérimentations locales, de retours d'expérience et d'ajustements organisationnels continus. Cette dimension invite à privilégier, dans le cas marocain, une approche graduelle et pragmatique, fondée sur des étapes successives, des projets pilotes et une montée en puissance progressive, plutôt que sur une transformation rapide susceptible de générer des déséquilibres institutionnels.

Enfin, deux enjeux transversaux méritent une attention particulière. D'une part, la question de la soutenabilité des technologies mobilisées, notamment au regard de leur consommation en énergie, en eau et en infrastructures numériques, invite à privilégier des architectures digitales efficientes, sobres et adaptées aux contraintes locales. D'autre part, la souveraineté des données hydriques apparaît comme un enjeu stratégique majeur, dans la mesure où ces informations conditionnent non seulement la sécurité alimentaire, mais également la stabilité économique et territoriale. Le renforcement des cadres de cybersécurité, la localisation des infrastructures critiques et la maîtrise des flux de données constituent, à cet égard, des conditions essentielles pour accompagner la transition vers une gouvernance hydrique fondée sur les données et orientée vers la résilience.

7.3. Limites de l'étude

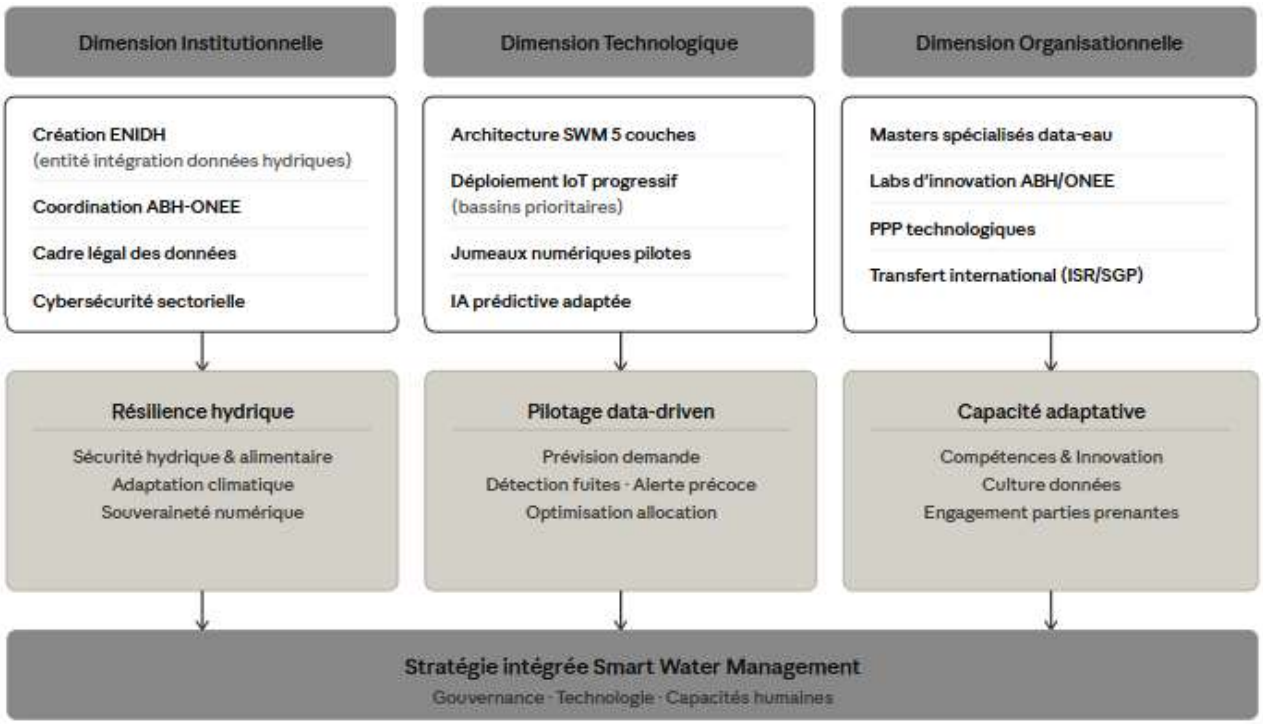
Cette recherche présente plusieurs limites. L'approche fondée exclusivement sur des données secondaires ne permet pas de capturer la totalité des dynamiques organisationnelles et politiques. L'absence d'entretiens avec les acteurs clés constitue une lacune que de futures recherches empiriques devront combler. La comparaison de pays aux configurations très différentes pose la question de la validité externe. Enfin, l'évolution rapide des technologies et des cadres réglementaires implique que certaines données utilisées pourraient devenir obsolètes rapidement.

8. PROPOSITION D'UN MODÈLE CONCEPTUEL

S'appuyant sur les résultats de l'analyse comparative et les lacunes identifiées, nous proposons un modèle conceptuel de gouvernance hydrique résiliente fondé sur les données, spécifiquement adapté au contexte marocain et aux contraintes institutionnelles qui le caractérisent. Ce modèle, intitulé « HYDRA-Gov » (HYdric Data-driven Resilient Adaptive Governance), articule trois dimensions interdépendantes, chacune assortie de leviers d'action opérationnels, de contraintes structurelles identifiées et de conditions explicites de réussite. Il vise à dépasser les approches fragmentées en proposant une lecture systémique et intégrée, dans laquelle la performance globale du système hydrique dépend de la cohérence, de l'articulation dynamique et de la complémentarité entre ces trois dimensions.

Plus précisément, ce cadre conceptuel repose sur l'idée que la résilience hydrique ne peut être atteinte ni par la seule modernisation technologique, ni par des réformes institutionnelles isolées, mais par une interaction continue entre gouvernance, données et capacités d'adaptation. En ce sens, HYDRA-Gov ambitionne de structurer un référentiel analytique et opérationnel permettant d'orienter les politiques publiques, de hiérarchiser les priorités d'investissement et de faciliter la coordination entre les différents acteurs impliqués dans la gestion de l'eau. Il constitue ainsi une proposition intégrée visant à renforcer la robustesse, l'agilité et la soutenabilité du système hydrique marocain face aux incertitudes climatiques et aux pressions croissantes sur les ressources.

Figure 5. Modèle conceptuel HYDRA-Gov : Gouvernance hydrique résiliente fondée sur les données



Source : Proposition de l'auteur (2024)

8.1. Dimension institutionnelle : vers un pilotage intégré

Le modèle propose la création d'une Entité Nationale d'Intégration des Données Hydriques (ENIDH), placée sous la tutelle du ministère de l'Équipement et de l'Eau, chargée de fédérer les systèmes d'information de l'ONEE, des ABH et des régies communales. Cette entité, inspirée du PUB singapourien sans en reprendre la centralisation absolue, assurerait l'interopérabilité, la standardisation des protocoles de collecte, la gouvernance des données et la conformité aux normes de cybersécurité. Sa mise en œuvre suppose une réforme législative complétant la loi 36-15 par des dispositions spécifiques sur les données hydriques, s'inscrivant dans le cadre de la loi 09-08 sur la protection des données personnelles et de la loi 05-20 sur la cybersécurité.

8.2. Dimension technologique : architecture adaptée au Maroc

L'architecture proposée reprend le modèle SWM (*Smart Water Management*) à cinq couches, adapté aux contraintes marocaines. La couche de captation privilégierait un déploiement progressif des capteurs IoT, en

commençant par les bassins les plus stressés (Souss-Massa, Tensift, Moulouya). La couche de transmission s'appuierait sur l'infrastructure numérique existante. La couche d'analyse intelligente intégrerait des algorithmes d'IA adaptés : prévision de la demande agricole, détection des prélèvements illégaux, optimisation de l'allocation inter-bassins, cartographie prédictive de la recharge des nappes. La couche d'aide à la décision fournirait des tableaux de bord en temps réel aux ABH et au ministère.

Le déploiement technologique devrait suivre une feuille de route en trois phases. La première phase (2025–2028) se concentrerait sur les bassins prioritaires avec l'installation de capteurs IoT sur les infrastructures critiques (barrages, stations de pompage, points de distribution majeurs) et la création d'une plateforme de données unifiée. La deuxième phase (2028–2032) étendrait le réseau IoT aux bassins secondaires, déploierait les premiers jumeaux numériques pilotes sur les stations de dessalement en construction et intégrerait des algorithmes de prévision de la demande. La troisième phase (2032–2035) viserait l'intégration complète à l'échelle nationale, avec des jumeaux numériques sur l'ensemble des infrastructures critiques et des capacités de simulation de scénarios climatiques.

Un point d'attention spécifique concerne les zones rurales, où les infrastructures de communication sont souvent limitées. Les solutions d'edge computing, traitant les données localement avant de transmettre des résumés vers le cloud central, ce qui offre une réponse adaptée à cette contrainte, en réduisant les besoins de bande passante et en améliorant la latence des alertes. L'expérience de l'Inde, où le système « Mera Gaon Hamara Jal » (Mon Village, Notre Eau) a démontré la faisabilité d'une plateforme de gouvernance décentralisée dans des contextes ruraux à faible connectivité, peut inspirer l'adaptation marocaine.

8.3. Dimension organisationnelle : capital humain et innovation

Le modèle identifie la création de masters spécialisés en « data science pour les ressources hydriques » au sein des universités marocaines comme un levier prioritaire, en partenariat avec les écosystèmes israéliens et singapouriens. La création de « labs d'innovation hydrique » au sein de l'ONEE et des ABH, sur le modèle des incubateurs de Mekorot, favoriserait le prototypage rapide de solutions. Le modèle souligne l'importance d'une gestion du changement structurée, intégrant formation continue, accompagnement des équipes et communication interne.

L'expérience singapourienne montre que le jumeau numérique peut lui-même servir d'outil de formation, en permettant aux opérateurs de s'exercer sur des scénarios simulés sans risque pour le système réel. Ce modèle de « formation par la simulation » est particulièrement adapté à la transmission de l'expertise dans un contexte de renouvellement générationnel de la main-d'œuvre. Pour le Maroc, l'adoption de cette approche supposerait de développer, dès la phase pilote du déploiement technologique, des modules de formation intégrés aux plateformes de jumeaux numériques, en partenariat avec les écoles d'ingénieurs et les universités marocaines.

La dimension partenariale du modèle est également cruciale. L'écosystème israélien de l'eau repose sur une synergie entre un opérateur national puissant (Mekorot), un tissu de plus de 130 startups spécialisées, des universités de recherche de rang mondial et un soutien public à l'innovation. Le Maroc peut s'inspirer de ce modèle en structurant un écosystème national de l'innovation hydrique, articulant les universités techniques (EMI, ENSAM, écoles d'ingénieurs), les opérateurs publics (ONEE, ABH) et les startups marocaines spécialisées dans l'IoT et l'IA. Le rôle catalyseur que pourraient jouer les Centres Régionaux d'Investissement (CRI) et les programmes d'incubation soutenus par la Caisse de Dépôt et de Gestion (CDG) mérite d'être exploré.

8.4. Feuille de route de mise en œuvre

La mise en œuvre du modèle HYDRA-Gov devrait suivre une approche progressive en trois horizons temporels. Le premier horizon (2025–2028) se concentrerait sur les fondations institutionnelles et les pilotes technologiques : création de l'ENIDH, adoption d'un cadre réglementaire sur les données hydriques, lancement d'un bassin intelligent pilote (Souss-Massa) et démarrage des formations spécialisées. Le deuxième horizon (2028–2032) viserait la montée en échelle : extension du réseau IoT aux bassins secondaires, déploiement des premiers jumeaux numériques sur les stations de dessalement, intégration de l'IA prédictive dans les processus décisionnels des ABH et création d'un observatoire national des données hydriques. Le troisième horizon (2032–2035) ciblerait la maturité systémique : couverture nationale de l'architecture SWM, jumeaux numériques cognitifs, IA prédictive intégrée à l'ensemble de la chaîne de valeur hydrique et capacité de simulation de scénarios climatiques.

Cette feuille de route implique un engagement financier progressif mais substantiel. En s'appuyant sur les estimations de la Banque asiatique de développement (ADB, 2021), selon lesquelles les investissements dans les technologies intelligentes représentent environ 11 % des dépenses totales d'une utility sur une décennie, le coût total de la transformation digitale du secteur hydrique marocain pourrait être estimé entre 1,5 et 2 milliards de dollars sur dix ans. Ce montant, rapporté aux 45 milliards de dollars du Plan National de l'Eau, représente un investissement marginal au regard des gains attendus en termes d'efficience opérationnelle, de réduction des pertes et d'amélioration de la résilience. Le modèle de financement devrait combiner budget public, partenariats public-privé, financements multilatéraux (Banque mondiale, BEI, BAD) et coopération bilatérale.

Tableau 14. Détail du modèle HYDRA-Gov : leviers, contraintes et conditions de réussite

Dimension	Leviers d'action	Contraintes	Conditions de réussite
Institutionnelle	Création ENIDH ; coordination ABH-ONEE-régies ; cadre légal données hydriques ; cybersécurité sectorielle	Fragmentation institutionnelle ; résistance au changement ; silos informationnels ; manque de standards	Volonté politique ; réforme législative ; gouvernance des données ; leadership ministériel
Technologique	Architecture SWM 5 couches ; IoT progressif par bassin ; jumeaux numériques pilotes ; IA prédictive	Coût investissement ; faiblesse réseaux ruraux ; cybervulnérabilités ; dépendance technologique	PPP ; feuille de route technologique ; cloud souverain ; open data
Organisationnelle	Masters spécialisés ; labs innovation ONEE/ABH ; transfert ISR/SGP ; e-learning opérateurs	Déficit compétences ; fuite des cerveaux ; culture organisationnelle pré-numérique	Partenariats académiques ; attractivité salariale ; gestion du changement structurée
Résilience	Diversification sources ; systèmes d'alerte IA ; simulation scénarios ; suivi nappes ML	Dépendance pluviométrie ; surexploitation nappes ; faible réutilisation ; 30 % pertes	Accélération dessalement ; tarification incitative ; REUT ; économie d'eau agricole

Source : Proposition de l'auteur (2024)

8.5. Ancrage et validation du modèle

Le Tableau 15 retrace, pour chaque composante du modèle HYDRA-Gov, la proposition théorique dont elle découle, le résultat empirique qui la soutient (Tableaux 11 et 12) et l'ancrage dans la littérature, conformément à l'exigence de confirmabilité du protocole de qualité (Tableau 13).

Tableau 15. Traçabilité et validation du modèle HYDRA-Gov

Composante du modèle	Prop.	Résultat empirique (Tableau 14)	Ancrage théorique
Création de l'ENIDH (entité nationale d'intégration des données hydriques)	**P1**	La fragmentation des données au Maroc est le principal frein identifié ; la coordination effective (Israël, Singapour) est le premier facteur de performance	Pahl-Wostl (2020) ; OCDE (2015) ; Huitema et al. (2009)
Architecture SWM à 5 couches, déploiement IoT progressif par bassin	**P2**	Les initiatives technologiques isolées (Maroc) ne produisent pas de transformation systémique ; l'architecture intégrée nécessite un cadre institutionnel	Dai et al. (2025) ; Fuller et al. (2020) ; Sit et al. (2020)
Masters spécialisés data-eau, labs d'innovation ABH/ONEE	**P3**	Le déficit de compétences est corroboré comme facteur discriminant transversal dans les trois cas ; l'écosystème d'innovation accélère l'adoption	ADB (2021) ; Zaryouh & Fahmi (2024) ; Dubois & Gadde (2002)
Jumeaux numériques pilotes, IA prédictive, systèmes d'alerte précoce	**P4**	La transition vers l'anticipation suit un gradient séquentiel (Maroc → Israël → Singapour), conditionné par la maturité préalable des dimensions P1+P2+P3	Butler et al. (2017) ; Grey & Sadoff (2007) ; Pahl-Wostl (2020)
Feuille de route en 3 horizons (2025–2028 / 2028–2032 / 2032–2035)	**P1–P4**	Les trajectoires de Singapour (~20 ans) et d'Israël (~15 ans) montrent que la transformation s'inscrit dans le temps long et procède par étapes cumulatives	Pahl-Wostl (2010) ; Yin (2018)
Cybersécurité sectorielle, cloud souverain	**P1+P2**	La cybersécurité est une composante structurelle, non optionnelle, des modèles performants (honeypots Mekorot ; cloud gouvernemental Singapour)	OCDE (2015) ; Dai et al. (2025)
PPP technologiques, transfert international (ISR/SGP)	**P2+P3**	Les écosystèmes d'innovation (Israël : 130+ startups ; Singapour : PUB-Jacobs-NRF) sont des accélérateurs documentés de la transformation	ADB (2021) ; Dubois & Gadde (2002)

Source : Élaboration de l'auteur (2025). Chaque composante est reliée à une proposition validée et à un fondement théorique

Cette validation demeure de nature conceptuelle : elle établit la cohérence interne du modèle et sa congruence avec les données observées, sans constituer une validation opérationnelle. Celle-ci suppose une mise en œuvre pilote, par exemple dans le bassin du Souss-Massa, suivie d'une évaluation empirique (voir section 9.3).

9. CONCLUSION

9.1. Synthèse des résultats

L'analyse comparative des trois cas confirme que la transition vers une gouvernance hydrique résiliente fondée sur les données repose sur la conjonction de trois conditions : une coordination institutionnelle effective (P1), une architecture technologique intégrée inscrite dans un cadre institutionnel cohérent (P2), et un capital humain spécialisé accompagnant le déploiement technologique (P3). L'IA ne produit une résilience anticipative que lorsque ces trois conditions sont simultanément réunies (P4). Israël offre le modèle le plus directement transférable au contexte marocain ; Singapour constitue l'horizon aspirationnel en matière d'intégration digitale. Le modèle HYDRA-Gov traduit ces enseignements en feuille de route opérationnelle articulée autour de trois dimensions interdépendantes et de trois horizons temporels..

9.2. Recommandations opérationnelles

Au-delà du modèle conceptuel, plusieurs recommandations opérationnelles se dégagent de cette recherche. La première concerne la nécessité d'un projet pilote de « bassin intelligent » (smart basin), qui servirait de démonstrateur technologique et institutionnel. Le bassin du Souss-Massa, qui cumule un stress hydrique extrême, une agriculture intensive d'exportation, une station de dessalement en cours d'extension et un tissu économique dynamique, constitue un candidat idéal pour ce pilote. L'expérience acquise pourrait ensuite être répliquée aux autres bassins selon la feuille de route technologique proposée.

La deuxième recommandation porte sur la création d'un « observatoire national des données hydriques », qui centraliserait les indicateurs clés de performance du système hydrique national et les rendrait accessibles en temps réel aux décideurs, aux chercheurs et au public. Cet observatoire, adossé à l'ENIDH proposée dans le modèle HYDRA-Gov, constituerait à la fois un outil de pilotage stratégique et un instrument de transparence et de redevabilité, conformément aux principes de l'OCDE sur la gouvernance de l'eau (OCDE, 2015).

La troisième recommandation concerne le financement. L'investissement dans la digitalisation du secteur hydrique doit être intégré au Plan National de l'Eau et bénéficier de financements dédiés, distincts des enveloppes consacrées aux infrastructures physiques. La Banque asiatique de développement (ADB, 2021) estime que les investissements dans les technologies intelligentes pour l'eau représentent environ 11 % des dépenses totales annuelles d'une utility typique sur une décennie, mais génèrent des économies de 7,4 % sur le coût total de base. Cet argument économique devrait convaincre les décideurs de la pertinence d'un investissement qui, bien que significatif à court terme, produit un retour mesurable à moyen terme.

La quatrième recommandation touche à la coopération internationale. Le Maroc dispose d'atouts spécifiques pour devenir un hub régional de l'innovation hydrique en Afrique du Nord et de l'Ouest. Sa position géographique, son expérience en matière de gestion des barrages, ses partenariats émergents avec Israël et sa candidature à l'organisation de la Coupe du Monde 2030 — qui nécessitera des infrastructures hydriques performantes — constituent autant de leviers pour accélérer la transformation. La création d'un programme de formation international en gouvernance hydrique data-driven, en partenariat avec Singapour (via le PUB) et Israël (via Mekorot), pourrait positionner le Maroc comme un leader régional dans ce domaine émergent.

9.3. Perspectives de recherche

Plusieurs pistes de recherche méritent d'être approfondies. Sur le plan empirique, une enquête de terrain auprès des gestionnaires de l'eau au Maroc : responsables ONEE, directeurs d'ABH, opérateurs de régies

communales , ect... permettrait de valider et d'enrichir le modèle HYDRA-Gov par des données primaires. Des entretiens semi-directifs avec les acteurs clés de la chaîne décisionnelle hydrique apporteraient un éclairage indispensable sur les dynamiques politiques, les résistances au changement et les opportunités concrètes de transformation. L'évaluation de la faisabilité économique d'une architecture SWM adaptée au contexte marocain, incluant une analyse coût-bénéfice du déploiement IoT par bassin, constitue un axe prioritaire.

Sur le plan théorique, l'articulation entre gouvernance des données et souveraineté numérique dans le secteur hydrique mérite une attention particulière. Les données sur l'état des nappes phréatiques, les niveaux des barrages et les schémas de consommation agricole revêtent un caractère stratégique, et leur hébergement, leur protection et leur partage soulèvent des questions complexes à l'intersection du droit des données, de la cybersécurité et de la géopolitique de l'eau. L'étude de l'IA explicable (XAI) comme condition d'adoption par les décideurs publics dans les pays en développement ouvre un champ prometteur, à l'intersection des sciences de gestion, de l'informatique et des politiques publiques.

Enfin, la dimension éthique de la gouvernance algorithmique de l'eau — équité d'accès, transparence des décisions automatisées, responsabilité en cas de défaillance, biais potentiels des modèles prédictifs en matière d'allocation des ressources — constitue un terrain de recherche encore largement inexploré et d'une importance croissante. Dans un pays comme le Maroc, où l'eau est un bien culturellement sacré et où les inégalités territoriales d'accès restent significatives, la question de la justice algorithmique appliquée à la ressource hydrique mérite une attention académique soutenue. Comment garantir que les algorithmes d'allocation optimisent non seulement l'efficience économique, mais aussi l'équité sociale et la durabilité environnementale ? Cette question, qui se situe au cœur du cadre WARATA, constitue à notre sens l'une des frontières les plus fécondes de la recherche en gouvernance hydrique pour la prochaine décennie.

BIBLIOGRAPHIE

1. Asian Development Bank. (2021). *Using artificial intelligence for smart water management systems* (ADB Brief No. 143). https://www.adb.org/publications/artificial-intelligence-smart-water-management
2. Butler, D., Ward, S., Sweetapple, C., Astaraie-Imani, M., Diao, K., Farmani, R., & Fu, G. (2017). Reliable, resilient and sustainable water management: The Safe & SuRe approach. *Global Challenges, 1*(1), 63–77. https://doi.org/10.1002/gch2.201600018
3. Dai, Y., Huang, Z., Khan, N., & Labbo, M. S. (2025). Smart water management: Governance innovation, technological integration, and policy pathways toward economic and ecological sustainability. *Water, 17*(13), 1932. https://doi.org/10.3390/w17131932
4. Direction Générale de la Météorologie. (2024). *Bilan climatique annuel du Maroc 2023–2024*. Ministère de l'Équipement et de l'Eau, Maroc.
5. Dubois, A., & Gadde, L.-E. (2002). Systematic combining: An abductive approach to case research. *Journal of Business Research, 55*(7), 553–560. https://doi.org/10.1016/S0148-2963(00)00195-8
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *AQUASTAT core database*. https://www.fao.org/aquastat
7. Grey, D., & Sadoff, C. W. (2007). Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy, 9*(6), 545–571. https://doi.org/10.2166/wp.2007.021
8. Guba, E. G., & Lincoln, Y. S. (1994). Competing paradigms in qualitative research. In N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), *Handbook of qualitative research* (pp. 105–117). Sage.
9. Huitema, D., Mostert, E., Egas, W., Moellenkamp, S., Pahl-Wostl, C., & Yalcin, R. (2009). Adaptive water governance: Assessing the institutional prescriptions of adaptive (co-)management from a governance perspective and defining a research agenda. *Ecology and Society, 14*(1), 26. https://doi.org/10.5751/ES-02827-140126
10. International Monetary Fund. (2022). *Morocco: Selected issues* (IMF Country Report No. 22/132). https://www.imf.org
11. Jiménez, A., Saikia, P., Giné, R., Avello, P., Leten, J., Liss Lymer, B., Schneider, K., & Ward, R. (2020). Unpacking water governance: A framework for practitioners. *Water, 12*(3), 827. https://doi.org/10.3390/w12030827
12. Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. Sage Publications.
13. Iancu, I., Vasilache, S., & Sacala, I. S. (2020). Smart water management systems: A systematic literature review. *Sustainability*, 12(19), 7955. https://doi.org/10.3390/su12197955
14. Ministère de l'Équipement et de l'Eau. (2022). *Plan National de l'Eau 2020–2050*. Royaume du Maroc.
15. OUHBI, H., & BOUDHAR, A. (2025). Water Sustainability and Policy in the Moroccan Context: Challenges, Solutions, and Future Perspectives. International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics, 6(8), 601–618, https://hal.science/hal-05219597v1
16. Özerol, G., Vinke-de Kruijf, J., Brisbois, M. C., Casiano Flores, C., Deekshit, P., Girard, C., Knieper, C., Mirnezami, S. J., Ortega-Reig, M., Ranjan, P., Schröder, N. J. S., & Schröter, B. (2018). Comparative studies of water governance: A systematic review. *Ecology and Society, 23*(4), 43. https://doi.org/10.5751/ES-10548-230443
17. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2015). *OECD principles on water governance*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264231124-en
18. Organisation for Economic Co-operation and Development. (2018). *Implementing the OECD principles on water governance: Indicator framework and evolving practices*. OECD Publishing.
19. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M. et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71
20. Pahl-Wostl, C. (2010a). A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. *Global Environmental Change, 20*(3), 354–365. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.01.001
21. Pahl-Wostl, C. (2010b). Analyzing complex water governance regimes: The Management and Transition Framework. *Environmental Science & Policy, 13*(7), 571–581. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.08.006
22. Pahl-Wostl, C. (2020). Enhancing the capacity of water governance to deal with complex management challenges: A framework of analysis. *Environmental Science & Policy, 107*, 23–35. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.011

23. Ritchie, H., & Roser, M. (2018). *Water use and stress*. Our World in Data. https://ourworldindata.org/water-use-stress
24. Sit, M., Demiray, B. Z., Xiang, Z., Ewing, G. J., Sermet, Y., & Demir, I. (2020). A comprehensive review of deep learning applications in hydrology and water resources. *Water Resources Research*, *56*(2). https://doi.org/10.1029/2019WR025619
25. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, *8*, 108952–108971. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358
26. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2024). *The United Nations world water development report 2024*. UNESCO.
27. UN-Water. (2023). *SDG 6 country acceleration case study: Singapore*. UN-Water.
28. UN-Water. (2024). *Progress on the level of water stress: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.4.2*. UN-Water.
29. World Bank. (2024). *World development indicators*. https://data.worldbank.org
30. Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.
31. Zaryouh, I., & Fahmi, Y. (2024). Smart water management: What implications for Morocco? In S. Motahhir & B. Bossoufi (Eds.), *Digital technologies and applications* (pp. 226–236). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68660-3_22